

Spannungs- und Verformungsanalyse an
einer Planeten-Wälz-Gewindespindel mit
physikalischen (spannungsoptischen) und
numerischen Modellen

Freigabe: Die Bearbeiter:
Matthias Hähnle

Betreuer:
Matthias Balazs

Der Abteilungsleiter:
Prof. Dr.-Ing. G. Hirzinger

Der stellv. Institutsdirektor:

Der Institutsdirektor:
Prof. Dr.-Ing. G. Hirzinger

Unterschriften:

M. Hähnle

M. Balazs

G. Hirzinger

G. Hirzinger

Dieser Bericht enthält:

161 Blatt davon

97 Bilder

16 ~~Diagramme~~ Lit.

Erklärung

Ich erkläre hiermit, daß ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig verfaßt und nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt habe.

Sämtliche benutzte Quellen und Hilfsmittel sind angegeben, wörtliche und sinngemäße Zitate sind als solche gekennzeichnet.

München, den 5. 12. 1995

M. Hähnle

Matthias Hähnle
Kapersburgstraße 4
61191 Rosbach v. d. Höhe

Vorwort und Danksagung

Besonderer Dank gilt meinen Betreuern an der Technischen Universität München Herrn Dr.-Ing. E. Ficker und an der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt Herrn Dipl. Ing. Matthias Balázs und Herrn Dipl. Ing. Bertram Willberg, auf deren sowohl wissenschaftlich fundierte als auch produktive Ratschläge und Hilfestellung ich mich jederzeit verlassen konnte.

Der Abteilung Robotik und Systemdynamik unter der Leitung von Prof. Dr. Ing. Gerd Hirzinger danke ich für die angenehme persönliche Zusammenarbeit und die Bereitstellung des Arbeitsplatzes inklusive der notwendigen Apparaturen und Hilfsmittel.

Ganz herzlich möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit einen Beitrag geleistet haben.

Inhalt :

1. Zusammenfassung	7
2. Einleitung	8
3. Aufgabenstellung	9
4. Grundlagen und Tools	10
4.1. Aufbau und Funktion der Planeten-Wälz-Gewindespindel	10
4.2. Statischer Lastfall	13
4.2.1. Freiheitsgrade und statische Bestimmtheit der Spindelstange	14
4.2.2. Freiheitsgrade und statische Bestimmtheit der Planeten	15
4.2.3. Freiheitsgrade und statische Bestimmtheit der Mutter	19
4.2.4. Statische axiale Belastung der Planeten-Wälz-Gewindespindel	21
4.2.5. Lagerung der Planeten-Wälz-Gewindespindel	22
4.3. Verfahren zur Form- und Verformungsbestimmung	25
4.3.1. Fotografisches Verfahren	26
4.3.2. Abdruckverfahren	28
4.3.3. Koordinatenmeßverfahren	29
4.3.4. Profilprojektionsverfahren	31
4.4. Spannungsoptik	33
4.4.1. Spannungsoptischer Effekt	33
4.4.2. Spannungsoptischer Einfrierversuch	36
4.4.3. Polariskop	38
4.4.4. Apparatur zur Wärmebehandlung	39
4.5. Numerische Modelle	41
5. Versuche	42
5.1. Kalibrierversuch, Systemtest	42
5.2. Spannungsoptisches Modell im Einfrierversuch	48

6. Ergebnisse	54
6.1. Spindelstange, Normmutter	55
6.1.1. Vor der Belastung im Einfrierversuch	57
6.1.2. Nach der Belastung im Einfrierversuch	64
6.2. Planeten, Führungsringe	77
6.2.1. Vor der Belastung im Einfrierversuch	78
6.2.2. Nach der Belastung im Einfrierversuch	86
6.3. Mutter	107
6.3.1. Vor der Belastung im Einfrierversuch	108
6.3.2. Nach der Belastung im Einfrierversuch	109
7. Fazit und Ausblick	111
8. Literatur	117
9. Formelzeichen	119

10. Anhang

- A. Meßprotokolle
- B. Zeichnungen
- C. Programme
- D. Materialblätter
- E. Sonstiges

1. Zusammenfassung

Transformation von Rotations- in Translationsbewegung und große Übersetzungsverhältnisse bei beliebigen Baugrößen und minimalem Bauraum sind Forderungen, die ein Getriebe nach der Bauart einer Planeten-Wälz-Gewindespindel (PWG) besonders gut erfüllt. Die Auslegung und Optimierung hinsichtlich des Wirkungsgrades einer solchen Spindel bereiten aber noch Schwierigkeiten, weil die elastischen, kinematischen und Reibungsverhältnisse nicht vollständig erfaßt sind.

Die Analyse eines physikalischen (spannungsoptischen) Modells der PWG, gefertigt aus heißhärtendem Epoxidharz Araldit-B* im Maßstab 5:1, bietet die Basis für weitere Optimierungen der Konstruktion.

Zunächst wurden grundlegende Überlegungen über Funktion, statische Bestimmtheit und Kraftfluß angestellt. Die daraus gewonnenen Ergebnisse flossen in die Planung des spannungsoptischen Einfrierversuchs ein. Im spannungsoptischen Einfrierversuch wird ein Modell der PWG aus Araldit-B erwärmt und dem Original entsprechend belastet, so daß die Verformungen und die Spannungen nach Abkühlung eingefroren sind und in polarisiertem Licht sichtbar gemacht und untersucht werden können.

Mit Hilfe fotografischer, Abdruck-, Projektions- und Koordinaten-Meßverfahren wurden Formvermessungen durchgeführt. Vor dem Einfrierversuch wurden Form- und Maßabweichungen der Modellbauteile aufgrund fehlerhafter Fertigung aufgezeigt. Die verschiedenen Verfahren zur Formvermessung dienten weiterhin dazu, die Verformungen aus den Belastungen im Einfrierversuch zu erkennen und zu quantifizieren.

Der spannungsoptische Einfrierversuch unter der Bedingung der gleichen Dehnungen von Modell und Original ($\epsilon' = \epsilon$) liefert aufgrund der zum Vergleich herangezogenen maximalen Nutzlast der Kunststoff-PWG nur geringe Verformungen und folglich geringen spannungsoptischen Effekt. Es ist sinnvoll, einen weiteren Versuch mit ($\epsilon' > \epsilon$) unter Beachtung der Nichtlinearitäten der Kontaktprobleme durchzuführen.

* Ciba AG, Wehr/Baden. Härter PSA (Phtalsäureanhydrid)

2. Einleitung

Komponenten im Maschinenbau unterliegen aus ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten meist den Forderungen optimaler Materialausnutzung und des Leichtbaus. Es gilt insbesondere in der Raumfahrttechnik das Verhältnis von Leistung zu Masse möglichst in die Höhe zu treiben. Im Rahmen des **RO**boter **T**echnologie **EX**periments (ROTEX) wurde für den Antrieb eines Robotergreifers ein Spindelgetriebe entwickelt. Die sogenannte **Planeten-Wälz-Gewindespindel** (PWG) setzt eine Rotationsbewegung eines elektrischen Antriebes mit hoher Drehzahl in eine extrem kraftvolle Translationsbewegung (bei minimalem Vorschub) um.

In dieser Hinsicht bietet die PWG gegenüber anderen Spindeltrieben, wie Kugelumlaufspindel, Rollengewindetrieb, Gewindespindel oder Rollringsspindel, entscheidende Vorteile.

Die bereits bewährte Konstruktion ist schon mehrmals überarbeitet worden und soll nun mit Hilfe physikalischer und numerischer Modelle untersucht werden. Ergebnisse aus numerischen Modellen müssen überprüfbar sein, so daß auf physikalische Modelle und Experimente nicht verzichtet werden kann. Zudem bietet die Simulation durch numerische Modelle oftmals keinen Zeit- oder Kostenvorteil.

Verfahren der Spannungsoptik haben sich in den letzten Jahrzehnten als erfolgreiche Hilfsmittel in der Getriebeoptimierung erwiesen. Es werden maßstabsgerechte Modelle der zu untersuchenden Getriebe aus spannungsoptisch aktivem Material gefertigt, an denen alle Spannungen und Verformungen im gesamten Bauteilvolumen leicht ermittelt werden können. Die Übertragbarkeit von Original zu Modell und umgekehrt ist nur von den Parametern Maßstabsfaktor und Elastizitätskonstante abhängig, so daß Übertragungsfehler gering sind. Das physikalische Modell macht gegenüber dem numerischen keine Vereinfachungen zwingend erforderlich. Es kann dazu dienen die Vereinfachungen für das numerische Modell richtig zu treffen und die numerischen Ergebnisse mit abgesicherten Daten zu überprüfen.

3. Aufgabenstellung

In der vorliegenden Diplomarbeit werden die Verformungen und die Spannungsverteilung in der Planeten-Wälz-Gewindespindel (Patent DLR) analysiert.

Dazu werden verschiedene Systeme zur Formvermessung und Verformungsbestimmung eingesetzt und verglichen.

Mit einem Modell der PWG aus Araldit-B wird im spannungsoptischen Einfrierversuch die Spannungsverteilung für statische Belastung ermittelt. Zur Durchführung der Versuche sind die notwendigen Aufbauten zu errichten und die Rahmenbedingungen zur Datenerfassung und Auswertung zu schaffen.

Aus den Ergebnissen sollen Vorschläge zur Verbesserung der Auslegungsvorgaben, der Konstruktion und der Fertigung abgeleitet werden.

Weiterhin werden die Ergebnisse als Grundlage für numerische Simulationen nach der Finite Elemente Methode (FEM) in ANSYS und insbesondere für die Simulation des dynamischen Lastfalls mit der Mehrkörper-Simulations-Software SIMPACK (entwickelt bei der DLR) zur Verfügung gestellt.

4. Grundlagen und Tools

4.1. Aufbau und Funktion der Planeten-Wälz-Gewindespindel

Die PWG dient zur Umsetzung einer Rotationsbewegung in eine Translationsbewegung.

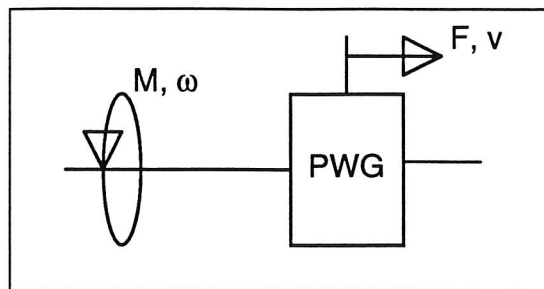


Bild 4.1.1.: Prinzipskizze der Transformation

Der Quotient aus Winkelgeschwindigkeit ω (Antrieb) und der Translationsgeschwindigkeit v (Abtrieb) wird als „Gesamtsteigung“ S_{ges} der PWG definiert. Daraus ergeben sich die folgenden Gleichungen zur Beschreibung der Eingangs- und Ausgangsparameter:

$$F = M \cdot \frac{2\pi}{S_{\text{ges}}}$$

F Axialkraft
 M Drehmoment
 S_{ges} Gesamtsteigung der PWG

$$v = \omega \cdot S_{\text{ges}}$$

v Translationsgeschwindigkeit
 ω Winkelgeschwindigkeit

Formel 4.1.1.: Statische und kinematische Transformation (ohne Reibungsverluste), [1]

Die in dieser Arbeit untersuchte Bauform der PWG (siehe Bild 4.1.2.) besteht aus einer Spindelstange (M6), fünf Planeten (linksgängiges Spezialgewinde, Steigung 1), zwei Führungsringen und der Mutter (Außendurchmesser 18mm, Länge 23mm). Als Materialien werden Polyamid, Polyester und faserverstärkte Spezialkunststoffe verwendet.

Die Spindelstange ist mit einem metrischen Gewinde versehen. Die Planeten wälzen um die Spindelstange und tragen ein Spezialgewinde mit konvexen Flanken und negativer Steigung. (Positive Steigung oder Rillenprofilierung auf den Planeten, mit gleicher Teilung wie auf der Spindelstange, ließen sich auch kombinieren.) Auf der Mutterinnenseite wälzen

die Planeten mit konvexen Ringnuten auf konkaven Mutterstegen ab. (Die Stege können auch geradflankig oder konvex ausgeführt sein.)

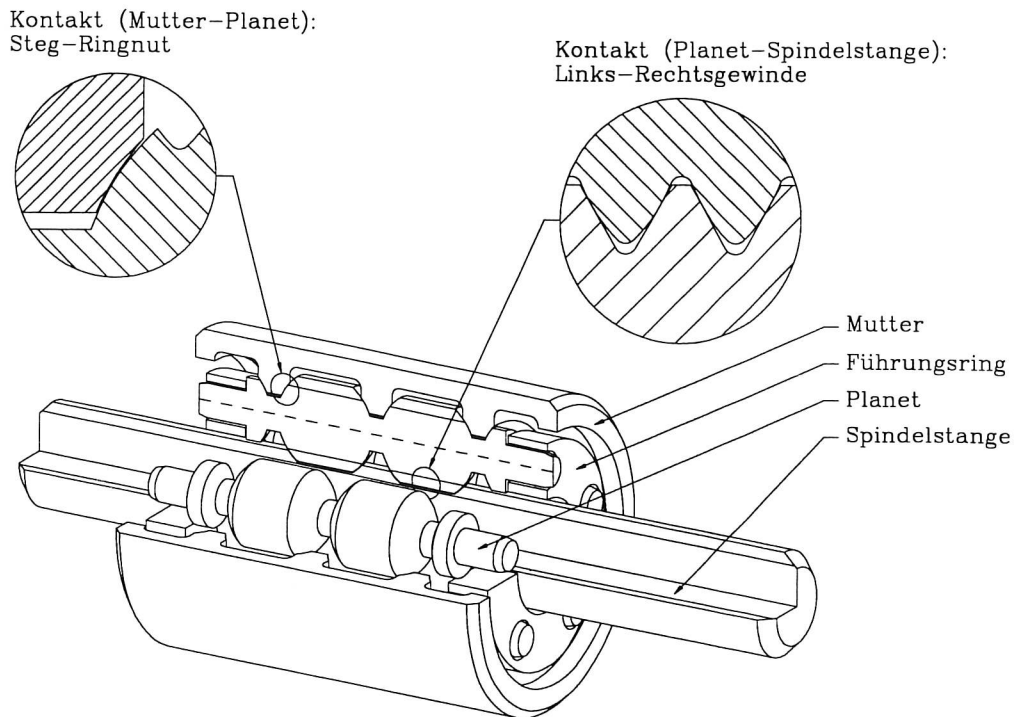


Bild 4.1.2.: Ausführung der Planeten-Wälz-Gewindespindel (PWG)

Aus der Steigung des Gewindes auf der Spindelstange und auf den Planeten, sowie den unterschiedlichen Wälzkreisdurchmessern von Spindelstange, den beiden Planetenprofilierungen und der Mutter ergibt sich das Übersetzungsverhältnis von Rotationsgeschwindigkeit ω zu Translationsgeschwindigkeit v , bzw. von Moment M zu Axialkraft F , und damit die Gesamtsteigung S_{ges} der PWG.

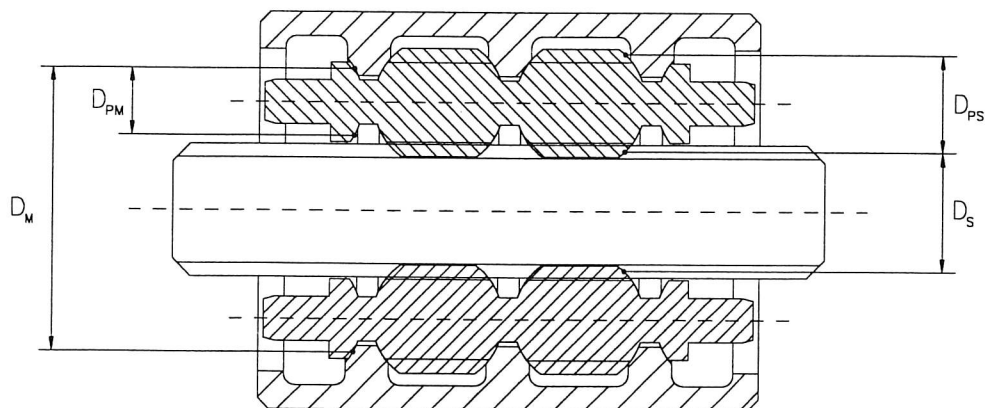


Bild 4.1.3.: Wälzkreisdurchmesser

$$S_{\text{ges}} = \frac{S_S \cdot \frac{D_{PS}}{D_S} + S_P}{\frac{D_{PM}}{D_M} + \frac{D_{PS}}{D_S}}$$

D_M	Wälzkreisdurchmesser der Mutter
D_{PM}	Wälzkreisdurchmesser des Planeten mutterseitig
D_{PS}	Wälzkreisdurchmesser des Planeten spindelseitig
D_S	Wälzkreisdurchmesser der Spindelstange
S_{ges}	Gesamtsteigung der PWG
S_P	Steigung des Planetengewindes; möglich sind $S_P=S_S$, $S_P=-S_S$ oder $S_P=0$, hier $S_P=-S_S$
S_S	Steigung des Spindelstangengewindes

Formel 4.1.2.: Gesamtsteigung der PWG, [1]

Durch Variation dieser Größen lassen sich beliebige Gesamtsteigungen der PWG verwirklichen. Beeinträchtigt wird die Steigungsgenauigkeit durch Schlupf. Schlupf ist möglich, weil die Kräfte in tangentialer Richtung, also das eingeleitete Moment, nur durch Reibschluß zwischen Spindel und Planet, sowie zwischen Planet und Mutter, übertragen werden. In axialer Richtung besteht Formschluß, so daß ein Durchrutschen ausgeschlossen ist.

4.2. Statischer Lastfall

Die Bauteile der PWG unterliegen im Einsatz statischen, quasistatischen und dynamischen Lasten. Die dynamischen Lasten sind abhängig von den Drehzahlen und den Beschleunigungen und machen nach grober Abschätzung im derzeit genutzten Anwendungsbereich weniger als 1% der maximal zulässigen Belastung aus.

Im Rahmen der vorliegenden Spannungs- und Verformungsanalyse durch den spannungsoptischen Einfrierversuch können Lasten nur statisch untersucht werden. Die Aufgabe einer dynamischen Betrachtung wird an die numerische Simulation in SIMPACK weitergegeben.

In den Untersuchungen der elastostatischen Verhältnisse im physikalischen und numerischen Modell werden auslegungsrelevante Spannungsspitzen in den Bauteilen lokalisiert. Erste Aussagen über die zu erwartenden Spannungen und Verformungen in der PWG lassen sich aus den Betrachtungen über statische Bestimmtheit und der Freiheitsgrade ableiten.

Die Einzelteile der PWG werden als starre Körper mit exakten Geometrien angenommen. Jeder Körper hat im Raum 6 Freiheitsgrade: 3 translatorische und 3 rotatorische. Die Freiheitsgrade werden durch die Lagerreaktionen und die Zwischenreaktionen eingeschränkt. Werden die 6 Freiheitsgrade durch genau 6 Reaktionen blockiert liegt statische Bestimmtheit vor.

Insgesamt sollte die PWG nur einen Freiheitsgrad besitzen: die Rotation der Spindelstange kinematisch gekoppelt mit der Translation der Mutter (siehe Bild 4.1.1.). Es wird sich herausstellen, daß weitere Freiheitsgrade vorhanden sind, weil die Zwischenreaktionen in Umfangsrichtung Reibkräfte sind, die keine statische Bestimmtheit gewährleisten können.

Diese überzähligen Freiheitsgrade beeinflussen die Funktion und die Lebensdauer der PWG extrem ungünstig und können durch gezielt gewählte Lagerung der PWG und genauere Führung der Planeten eingeschränkt werden.

Die Kontaktpunkte zwischen Spindelstange, Planeten und Mutter sind aufgrund elastischer Abplattung nach Hertz, Kontaktflächen. Innerhalb dieser Kontaktflächen treten bei dynamischer Belastung durch die Querdehnungsverhältnisse Haft- und Gleitreibung (auch als „Schlupf“ bezeichnet) und durch die kinematischen Verhältnisse bohrende Reibung auf. Diese Effekte werden hier nicht berücksichtigt, es wird das vereinfachte Newton'sche Reibmodell mit maximal übertragbarer Reibkraft proportional Normalkraft im Kontaktpunkt vorausgesetzt.

Die folgende Betrachtung geht von einer rotatorisch angetriebenen Spindelstange und einer drehfest gelagerten Mutter aus. Der Antrieb könnte auch an der Mutter angreifen. Wählt man ein mit der negativen Antriebswinkelgeschwindigkeit rotierendes Bezugssystem, ergibt sich die Betrachtung analog und führt zu den selben Ergebnissen.

4.2.1. Freiheitsgrade und statische Bestimmtheit der Spindelstange

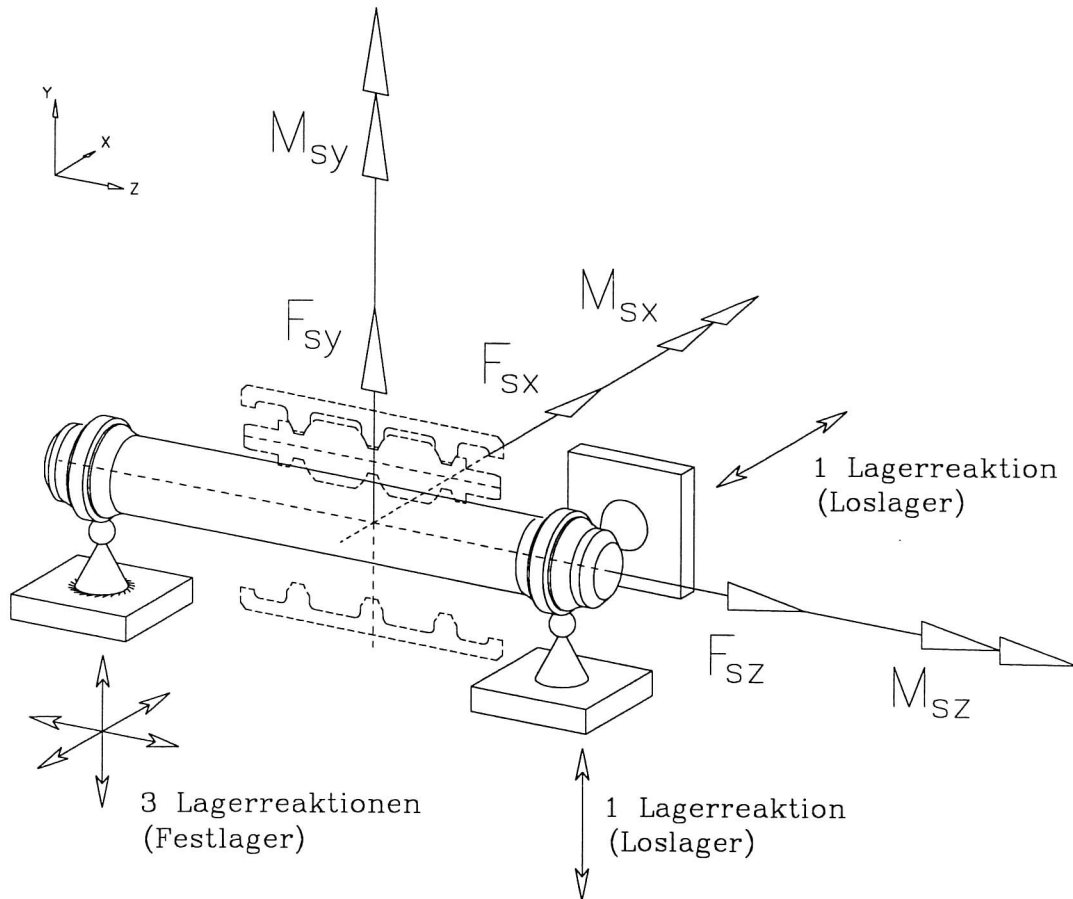


Bild 4.2.1.1.: Lager- und Zwischenreaktionen an der Spindelstange

Das Antriebsmoment, das vom Elektromotor erzeugt wird, entspricht dem Moment um die z-Achse (M_{sz}). Die Rotation der Spindelstange um die z-Achse ist der einzige Freiheitsgrad, der von der Fest-Los-Lagerung der Spindelstange nicht blockiert wird. Das Antriebsmoment (M_{sz}) wird vollkommen auf die Planeten übertragen.

⇒ Als Reaktion erhält man am Abtrieb eine Axiallast, die F_{sz} entspricht und vollkommen von der Lagerung aufgenommen werden muß.

⇒ Kräfte in x- und y-Richtung (F_{sx} , F_{sy}) und die Momente um die x- und y-Achse (M_{sx} , M_{sy}) sind theoretisch $=0$, zur Untersuchung der statischen Bestimmtheit und der Freiheitsgrade aber >0 angenommen. Diese Kräfte und Momente werden ebenso wie F_{sz} von der Fest-Los-Lagerung aufgenommen.

4.2.2. Freiheitsgrade und statische Bestimmtheit der Planeten

Das Antriebsmoment M_{sz} wird über die Kontaktpunkte auf den Gewindeflanken übertragen. Durch die Steigungs- und Flankenwinkel liegen die Normal- und Reibkräfte im Raum. Man erhält Komponenten der Kräfte und Momente in x-, y-, und z-Richtung:

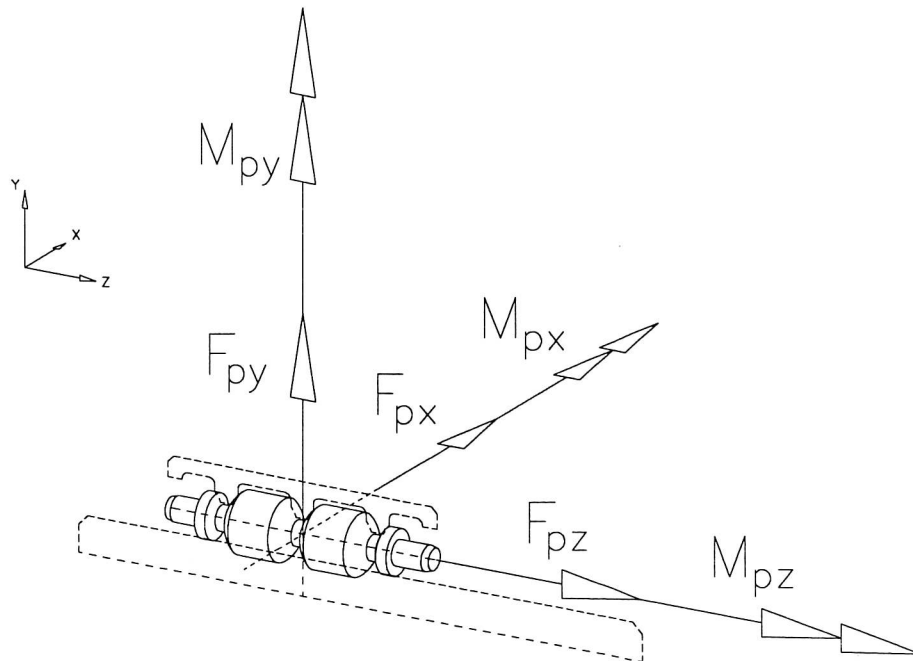


Bild 4.2.2.1.: Kräfte und Momente im Schwerpunkt des Planeten

Die Tangentialebenen in den Kontaktpunkten ergeben über ihre Flächennormale (\vec{n}) die Richtungen der Normalkräfte. Für kleine Steigungen auf Planeten und Spindelstange liegen die Kontaktpunkte spindelstangen- (ps) und mutterseitig (pm) angenähert in der y-z-Ebene.

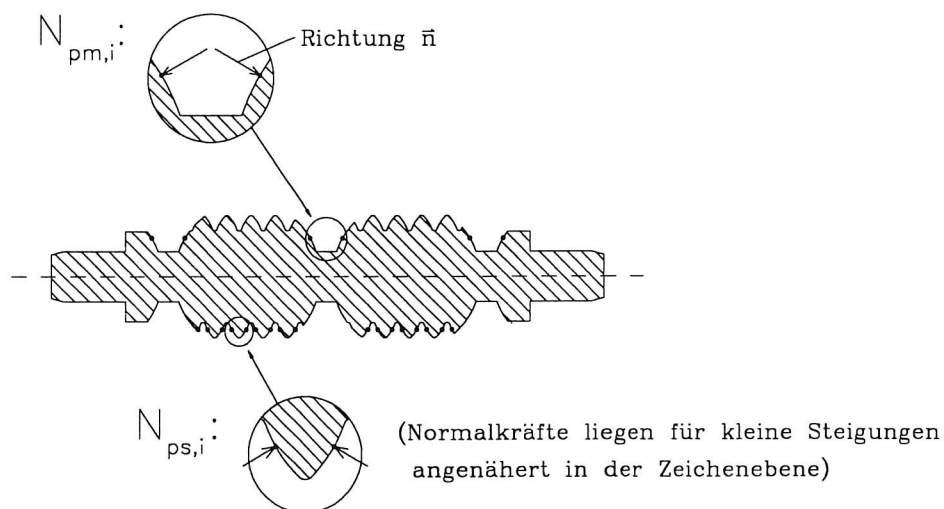


Bild 4.2.2.2.: Normalkräfte in den Kontaktpunkten des Planeten spindelstangen- und mutterseitig

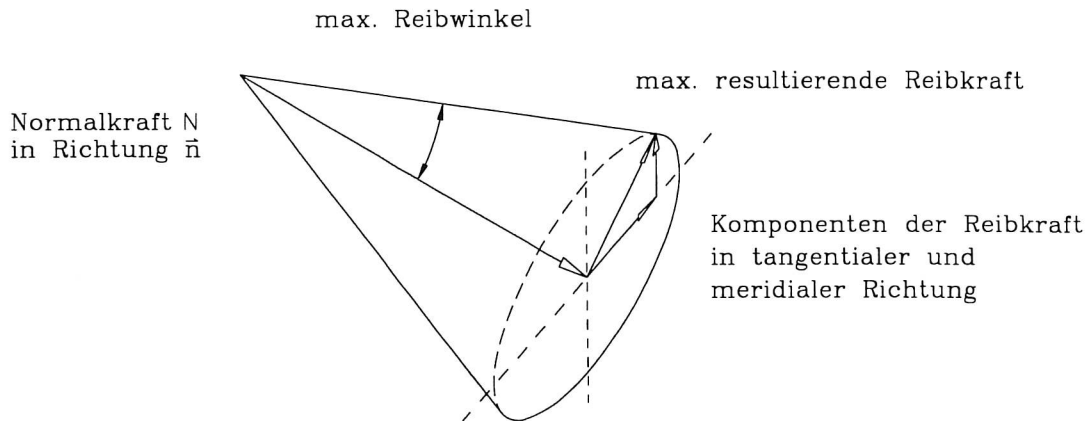


Bild 4.2.2.3.: Normalkraft und Reibkräfte in den Kontaktpunkten

Die Normalkraft (N) wirkt in Richtung der Flächennormale (\vec{n}). Senkrecht zur Normalkraft werden nur Reibkräfte übertragen. Die vektorielle Summe der Reibkraftkomponenten in tangentialer und meridionaler Richtung, bzgl. der Oberfläche der Gewindeflanke, kann den maximalen Wert der Reibkraft, dargestellt als Reibkegel, nicht überschreiten.

⇒ Kräfte in y - und z -Richtung (F_{py} , F_{pz}) werden von den Normalkräften in den spindelstangen- und mutterseitigen Kontaktpunkten aufgenommen. In z -Richtung besteht sogenannter Formschluß.

⇒ Das Moment um die x -Achse (M_{px}) wird ebenso von den Normalkräften in den Kontaktpunkten aufgenommen.

Durch die Vielzahl der Kontaktpunkte ist mit den Formeln der Statik keine Berechnung der einzelnen Normalkräfte möglich. Die Kräfteverteilung kann abgeschätzt werden (siehe Kapitel 4.2.4.).

⇒ Die Kraft in x -Richtung (F_{px}) und die Momente um die y - und z -Achse (M_{py} , M_{pz}) bedürfen als Reaktionen Reibkräfte, deren Maximalwert von den Normalkräften in den Kontaktpunkten abhängig ist. Ergibt sich die vektorielle Summe der zu übertragenden Kräfte nicht größer als die max. mögliche Reibkraft, besteht Haftreibung und man erhält mehr Reaktionen als zur statischen Bestimmtheit notwendig sind. Ist die Haftreibung jedoch nicht ausreichend, sind 3 Freiheitsgrade möglich (siehe Bild 4.2.2.4.): Verdrehen des Planeten um die y -Achse (D_{py} , „Verschränken“), Verdrehen um die z -Achse (D_{pz} , „Schlupf“) und Verschieben entlang der Umfangsrichtung x (D_{sz} , ebenfalls als „Schlupf“ bezeichnet).

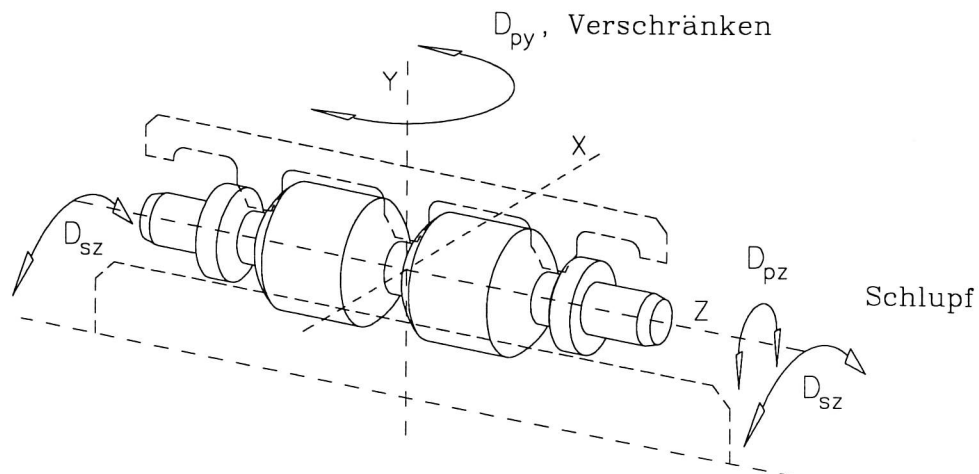


Bild 4.2.2.4.: Freiheitsgrade der Planeten

Zur Verdeutlichung der Bewegungsmöglichkeiten der Planeten sei folgende vereinfachte schematische Lagerung von verbundenen Zylindern betrachtet:

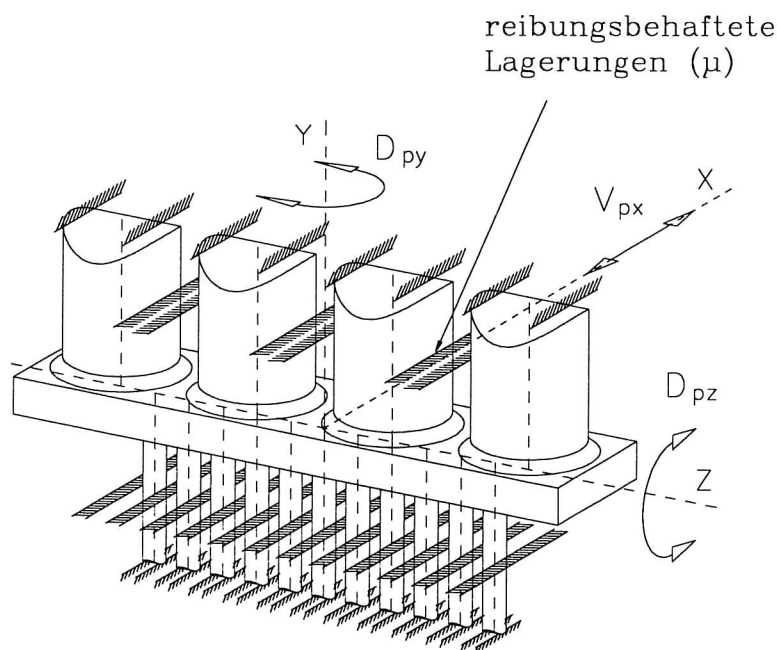


Bild 4.2.2.5.: Analoge Betrachtung zu Freiheitsgraden der Planeten

⇒ Da die Lagerreaktionen in einer Ebene (y-z-Ebene) liegen, können sie ein eingepreßtes Moment bzw. die Rotation um die y-Achse (D_{py}) erst blockieren, wenn eine Verdrehung stattgefunden hat.

⇒ Die Rotation um die z-Achse (D_{pz}) und die Verschiebung entlang der x-Achse ($V_{px} = D_{sz} \cdot r$) ist nur blockiert, wenn eine Kraft in z-Richtung wirkt, die ausreichend große Reibkräfte, d. h. Haftreibung ermöglicht.

Die Freiheitsgrade „Verschränken“ und „Schlupf“ werden durch die Führungsringe an den Stirnseiten behindert. Die fünf Planeten werden in Umfangsrichtung auf gleichem Abstand gehalten, das Verschränken einzelner Planeten wird unterbunden. Die Führung ist jedoch mit Spiel ausgeführt, so daß lediglich grobe Fehlstellungen der einzelnen Planeten verhindert werden. Gleichzeitiges Verschränken aller Planeten ist nicht ausgeschlossen (siehe Kapitel 6.2.).

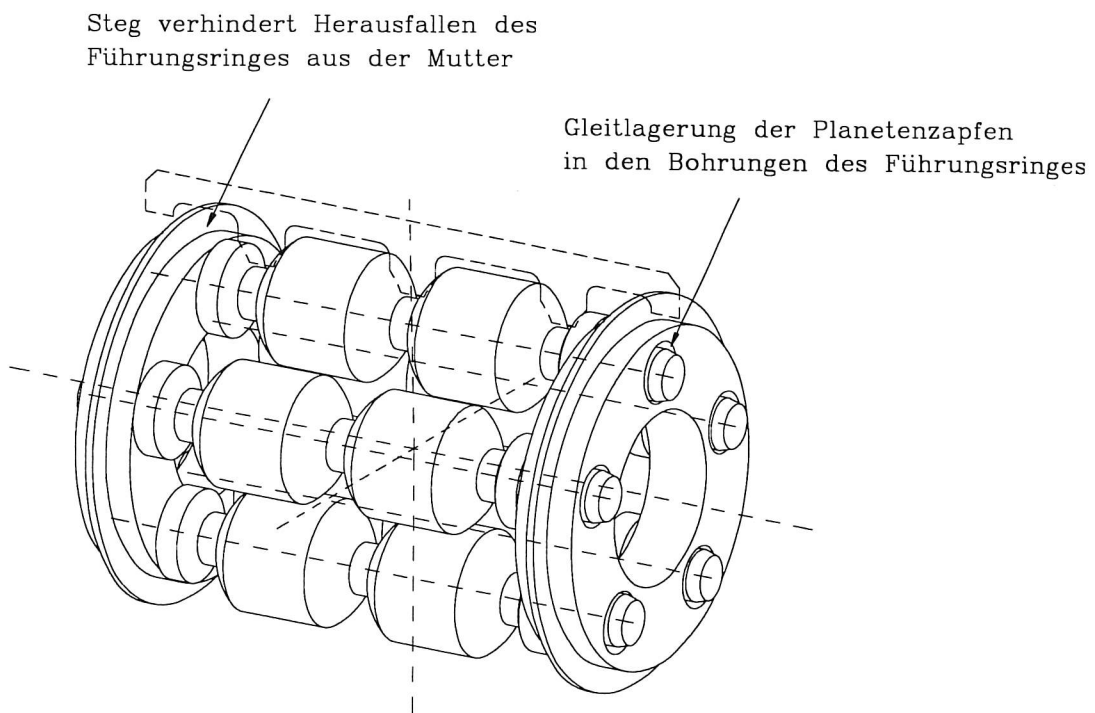


Bild 4.2.2.6.: Satz von fünf Planeten mit Führungsringen

4.2.3. Freiheitsgrade und statische Bestimmtheit der Mutter

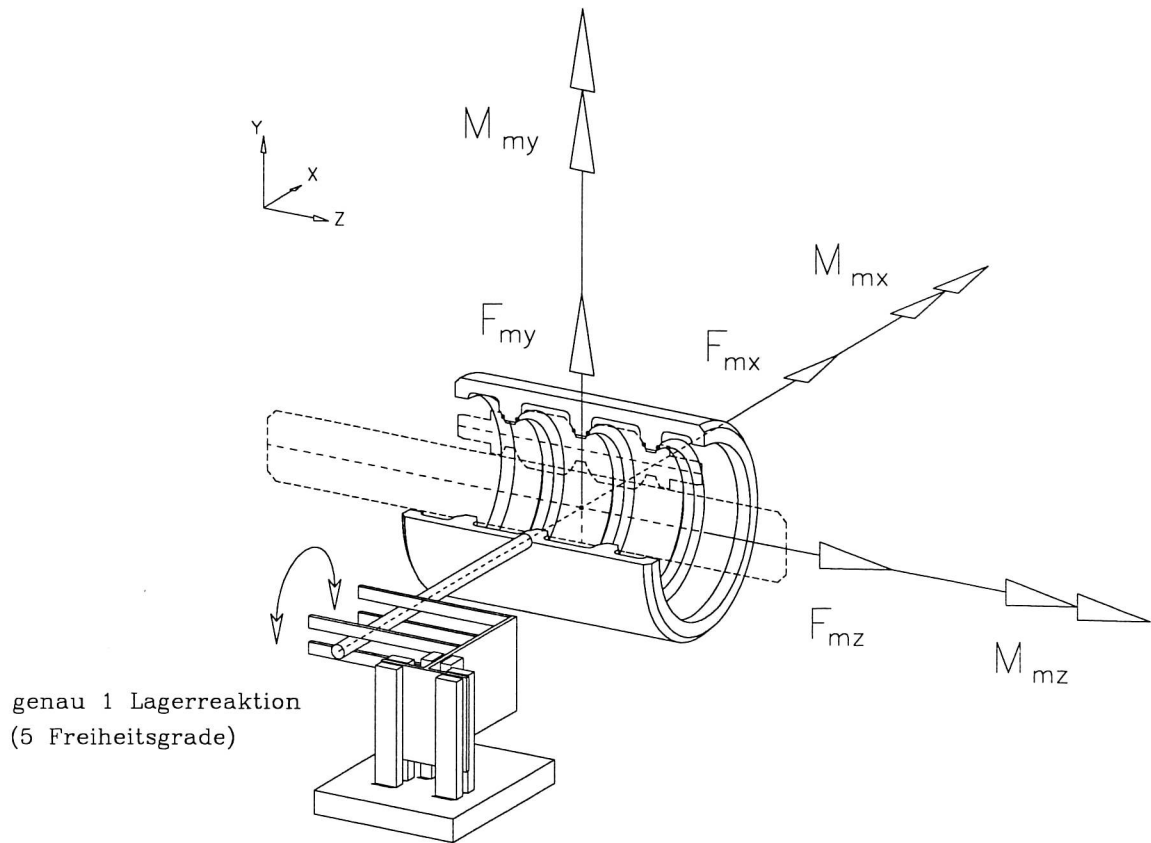


Bild 4.2.3.1.: Lager- und Zwischenreaktionen an der Mutter

⇒ Kräfte in x-, y- und z- Richtung (F_{mx} , F_{my} , F_{mz}) werden durch entsprechende Komponenten der Normalkräfte in den Kontaktpunkten abgestützt. In z-Richtung besteht sogenannter Formschluß.

⇒ Die Normalkräfte und die Momente um die x- und y-Achse (M_{mx} , M_{my}) werden ebenfalls durch die Kontaktkräfte über die Planeten an der Spindelstange abgestützt.

⇒ Das Moment um die z-Achse (M_{mz}) wird über die Reibkräfte in den Kontaktpunkten zu den Planeten eingeleitet und muß über eine äußere verdrehsteife Lagerung (genau eine Lagerreaktion: M_z) aufgenommen werden.

⇒ Da die Planeten mehrere Freiheitsgrade (siehe Bild 4.2.2.4.) besitzen, ist auch die Lage der Mutter bezüglich der Spindelstange nicht eindeutig bestimmt. Verschränken die Planeten, kann die Mutter sich um die x- oder y-Achse geringfügig verdrehen (D_{mx} , D_{my} , „Taumeln“). Würde man die PWG ohne Führungsringe betreiben, könnten sich die Planeten in Umfangsrichtung verschieben, so daß sie nicht mehr äquidistant am Umfang verteilt wären. Radialer Versatz bzgl. der z-Achse wäre möglich.

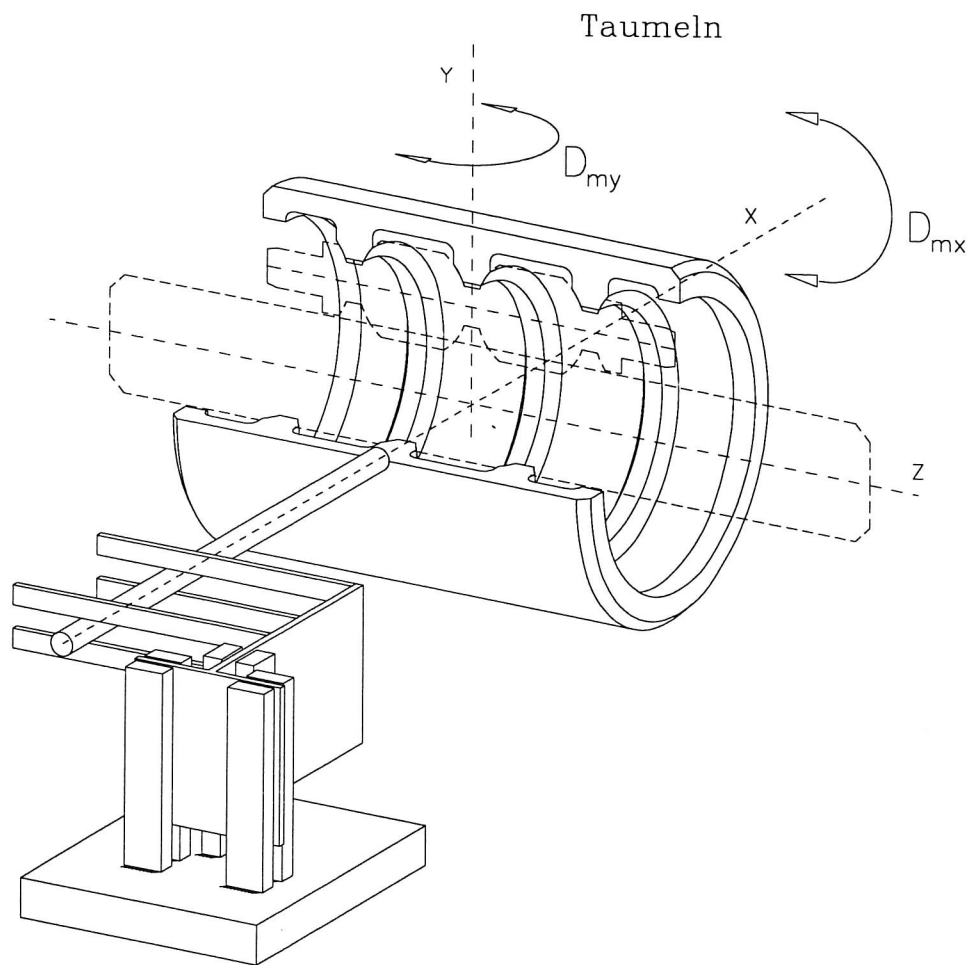


Bild 4.2.3.2.: Freiheitsgrade der Mutter resultierend aus den Freiheitsgraden der Planeten

4.2.4. Statische axiale Belastung der PWG

Die PWG wird im Einfrierversuch mit einer statischen Kraft in z-Richtung (F) beansprucht.

→ Betrachtet man die Lastverteilung in der Schnittebene der Kontaktpunkte eines Planeten, so zeigt das Momentengleichgewicht um den Schwerpunkt S , daß eine ungleichmäßige Lastverteilung zu erwarten ist:

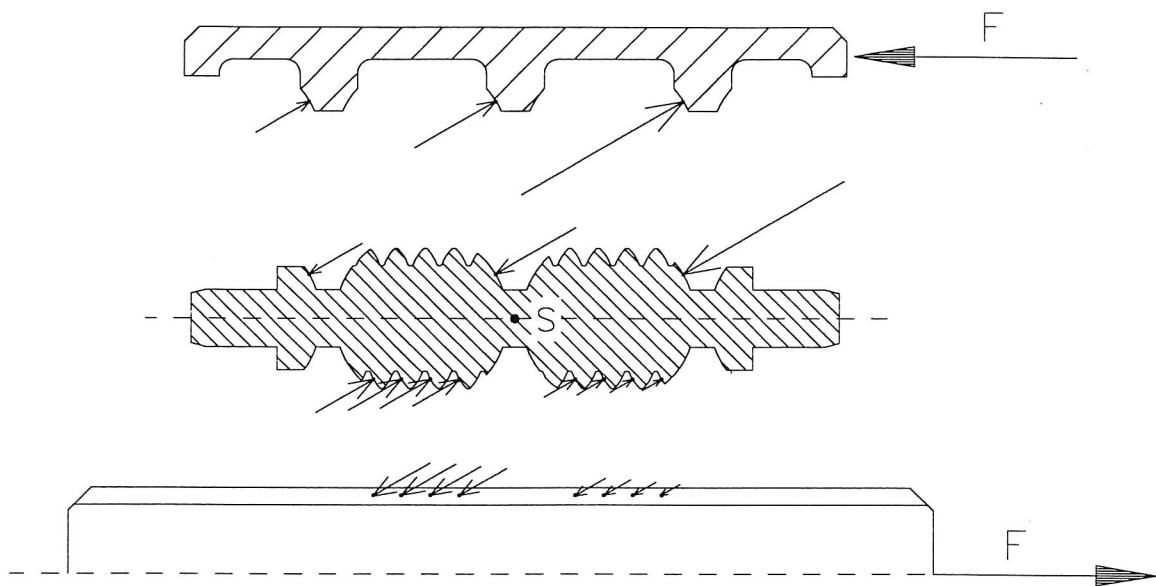


Bild 4.2.4.1.: Ungleichmäßige Lastverteilung bei axialer Belastung für Momentengleichgewicht um S

→ Die axiale Last wird über die Spindelstange in die PWG eingeleitet und läuft über die fünf Planeten in die Mutter. Bei rein statisch bestimmter Betrachtung können maximal nur drei Planeten im Kraftfluß liegen. Die Symmetrieverhältnisse lassen auf eine gleichmäßige Lastverteilung hoffen. Wieviel und welche der Planeten tatsächlich tragen, hängt von den elastischen Verformungen, den Fertigungstoleranzen der Bauteile und der äußeren Lagerung der PWG ab, Bauarten mit 15 Planeten sind im industriellen Einsatz.

4.2.5. Lagerung der PWG

Aus den obigen Betrachtungen geht hervor, daß die PWG nicht nur den gewünschten Freiheitsgrad der Rotation der Spindelstange kinematisch gekoppelt mit der Translation der Mutter aufweist. Eine statisch bestimmte Lagerung mit sechs Lagerreaktionen nach Bild 4.2.5.1. ist also nicht ausreichend, um insgesamt ein Mehrkörpersystem mit genau einem Freiheitsgrad zu erhalten.

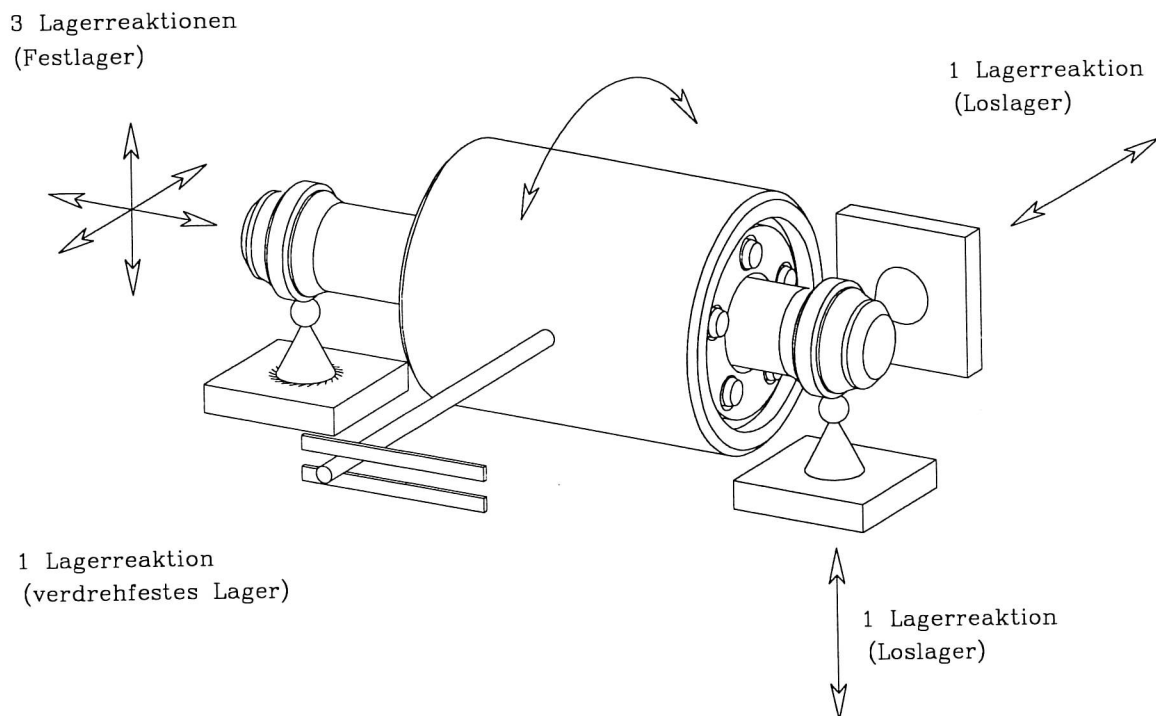


Bild 4.2.5.1.: Lagerreaktionen bei statisch bestimmter Lagerung

Eine solche Lagerung ist außerdem nur in sehr aufwendiger Konstruktion zu verwirklichen. Realisierbare Lagerungen weisen mehr Lagerreaktionen auf, als zur statischen Bestimmtheit notwendig sind. Dieser Umstand ist für die PWG sogar günstig, denn die ungewünschten Freiheitsgrade der PWG können dadurch eingeschränkt werden.

Ein Beispiel zeigt Bild 4.2.5.2. mit einer starren Anbindung der Mutter an eine Führung, die genau einen Freiheitsgrad offen läßt. Taumeln und radialer Versatz der Mutter bzgl. der Spindelstange sind ausgeschlossen. Allerdings ist mit Spannungen und Verformungen, die nicht mehr eindeutig aus den eingprägten Lasten hervorgehen, zu rechnen.

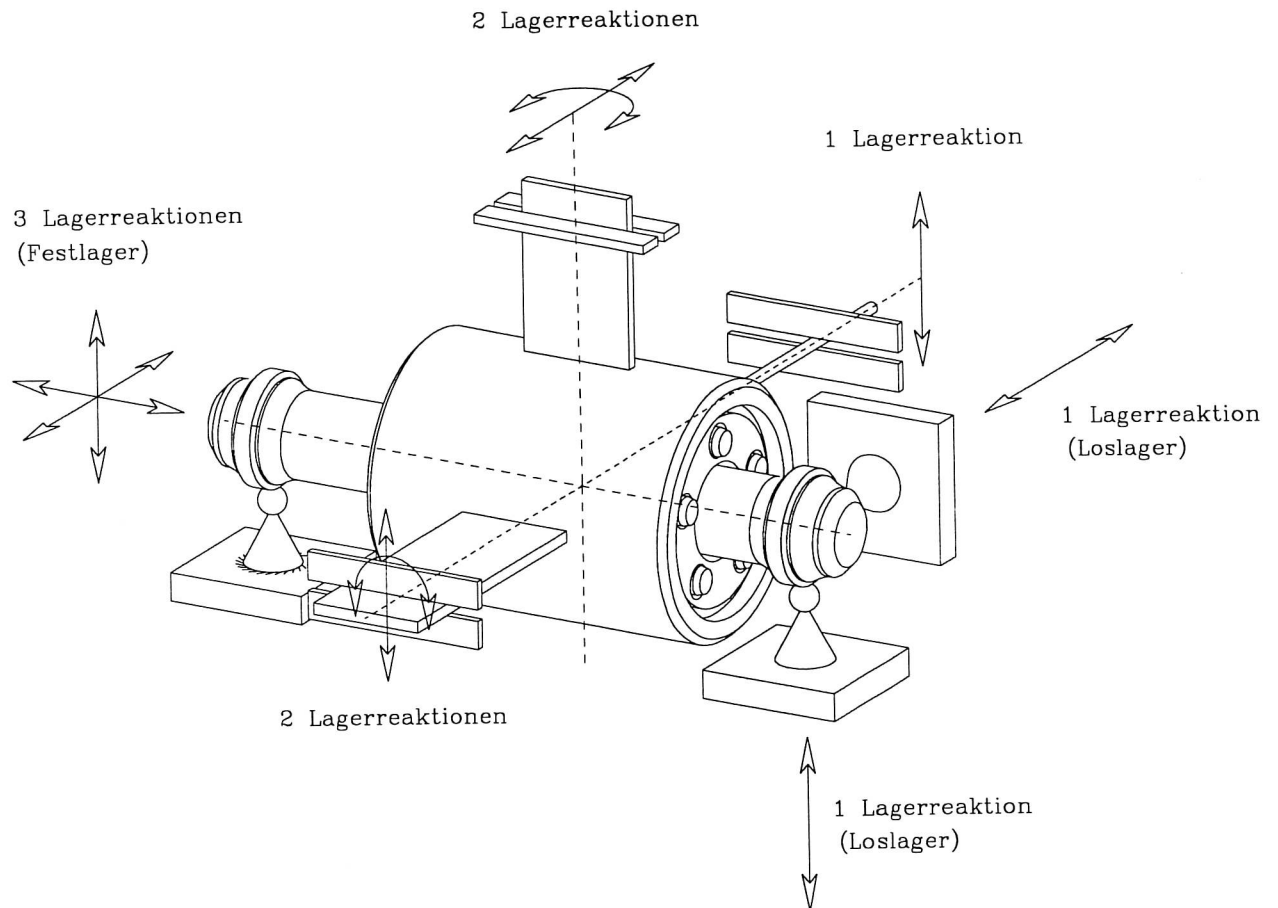


Bild 4.2.5.2.: Lagerung der PWG mit mehr Reaktionen als zur statischen Bestimmtheit notwendig

Einflüsse der Lagerung auf die Belastung der PWG werden durch die Aufhängung wie in Bild 4.2.5.3. dargestellt ausgeschlossen. Diese Lagerung setzt Selbsthemmung der PWG voraus und wäre wegen fehlender Lagerreaktionen für den praktischen Einsatz der PWG nicht tauglich. Sie verwirklicht aber auf einfache Weise den statischen Lastfall nach Kapitel 4.2.4..

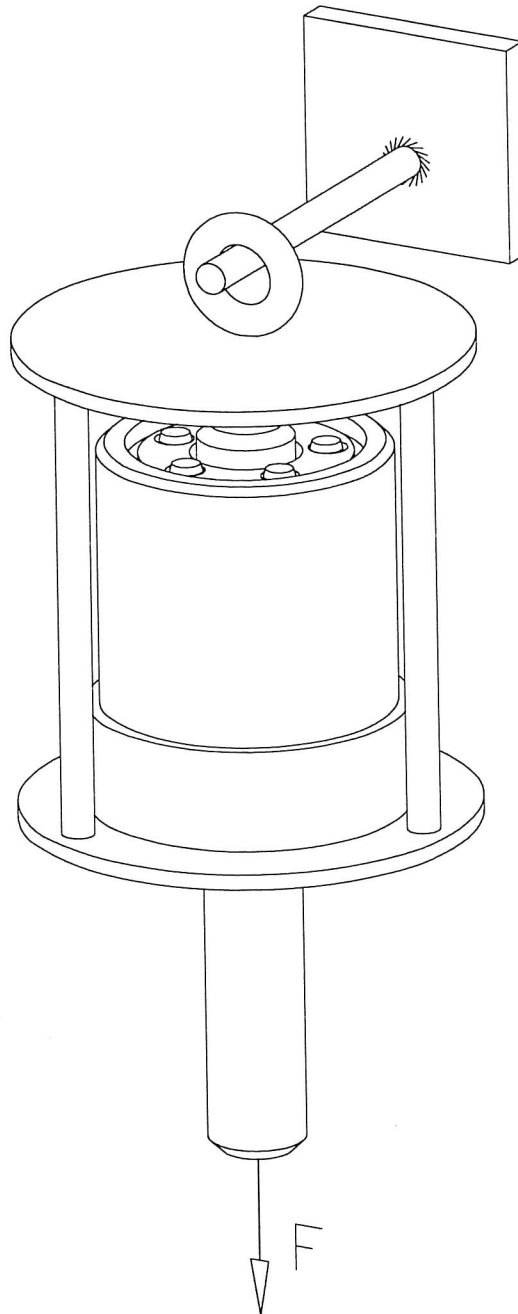


Bild 4.2.5.3.: Lagerung der PWG im spannungsoptischen Einfrierversuch

4.3. Verfahren zur Form- und Verformungsbestimmung

Durch Belastungen hervorgerufene Verformungen am Modell der PWG werden aus den Differenzen der Formen vor und nach dem spannungsoptischen Einfrierversuch ermittelt. Die Form der Bauteile muß mit hoher Genauigkeit festgehalten werden und gegenüberzustellen sein.

Die verschiedenen Verfahren zur Formvermessung werden in den folgenden Kapiteln beschrieben. Einen tabellarischen Überblick gibt Bild 4.3.1..

Im Vergleich der Verfahren schneidet die Koordinatenmessung mittels der Profilprojektion für den vorliegenden Anwendungsfall am günstigsten ab. Die Genauigkeit ist am größten und die Meßwertverarbeitung durch elektronische Speicherung am komfortabelsten. Die Aussagefähigkeit über Verformungen ist jedoch eingeschränkt durch die begrenzte Anzahl der Meßpunkte. Es können nur Meßpunkte aufgenommen werden, die sich bei der Messung nach dem Einfrierversuch wiederfinden lassen.

	Fotografisches Verfahren	Abdruckverfahren	Koordinatenmeßverfahren	Profilprojektionsverfahren
Geräteaufwand	- Fotoausrüstung - Diaprojektor - Mikrometerschraube - Meßschieber	- Abdruckmasse - Stützform - Messer - Mikrometerschraube - Meßschieber	- 3-Achsen Fräsmaschine + Meßoptik - Auswertesystem: * PC * Software	- Profilprojektor - Auswertesystem: * Fotoausrüstung * PC * Software
Zeitaufwand	gering	gering	sehr hoch	hoch
Vergleichbarkeit (vor/nach Versuch)				
qualitativ	gut	gut	gut	sehr gut
quantitativ	gut	schlecht	sehr gut	sehr gut
Auflösung	0,1mm	(0,05mm)	0,01mm	0,005mm
Fehlermöglichkeit	groß	groß	gering	gering
Komplexität der Abbildung	- Außenkonturen	- Außenkonturen - Innenkonturen - Hinterschnidungen - Oberflächen	- Punkte auf der Außenkontur	- Außenkonturen - Punkte auf der Außenkontur

Bild 4.3.1.: Gegenüberstellung der Verfahren zur Form- und Verformungsbestimmung

4.3.1. Fotografisches Verfahren

Fotografieren der Modellbauteile bietet eine schnelle Abbildungsmöglichkeit der gesamten Kontur in einer bestimmten Schnittebene. Aufgrund des nicht parallelen Strahlengangs verläuft die aufgenommene Schnittebene bei zylindrischen Bauteilen nicht durch die Symmetrieachse.

Der Fehler kann in folgender Weise abgeschätzt werden:

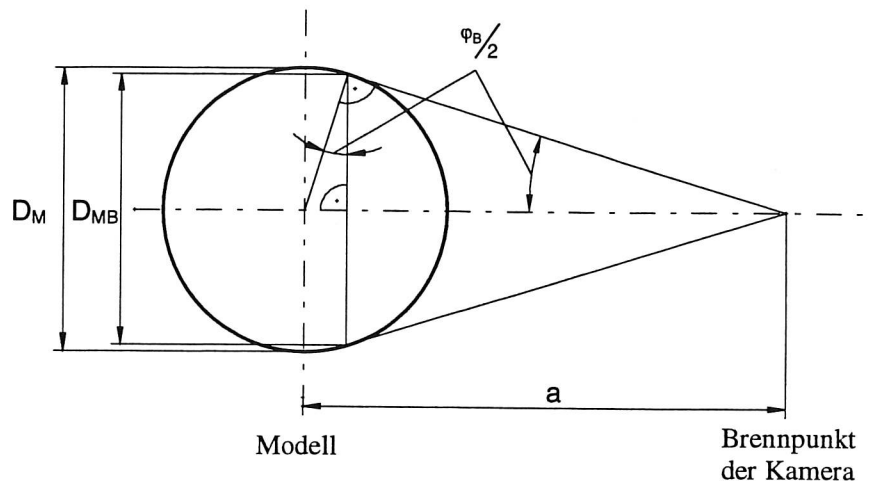


Bild 4.3.1.1.: Strahlengang der aufgenommenen Schnittebene

Aus
$$x_{\text{‰}} = \left(\frac{D_M - D_{MB}}{D_M} \right) \cdot 1000 \text{‰}$$

mit
$$\sin \varphi_{B/2} = \frac{D_M/2}{a}, \quad \cos \varphi_{B/2} = \frac{D_{MB}/2}{D_M/2}$$

folgt

$$x_{\text{‰}} = \left[1 - \cos \left(\arcsin \frac{D_M}{2a} \right) \right] \cdot 1000 \text{‰}$$

a Abstand
 D_M Durchmesser des Modells
 D_{MB} scheinbarer Durchmesser in der Abbildung
 φ_B Blickwinkel

Formel 4.3.1.1.: Relativer Fehler in Abhängigkeit von Durchmesser und Abstand für seitlich betrachteten Zylinder

Fehler x in [%] durch Verdeckung bei
zylindrischen Bauteilen in Seitenansicht

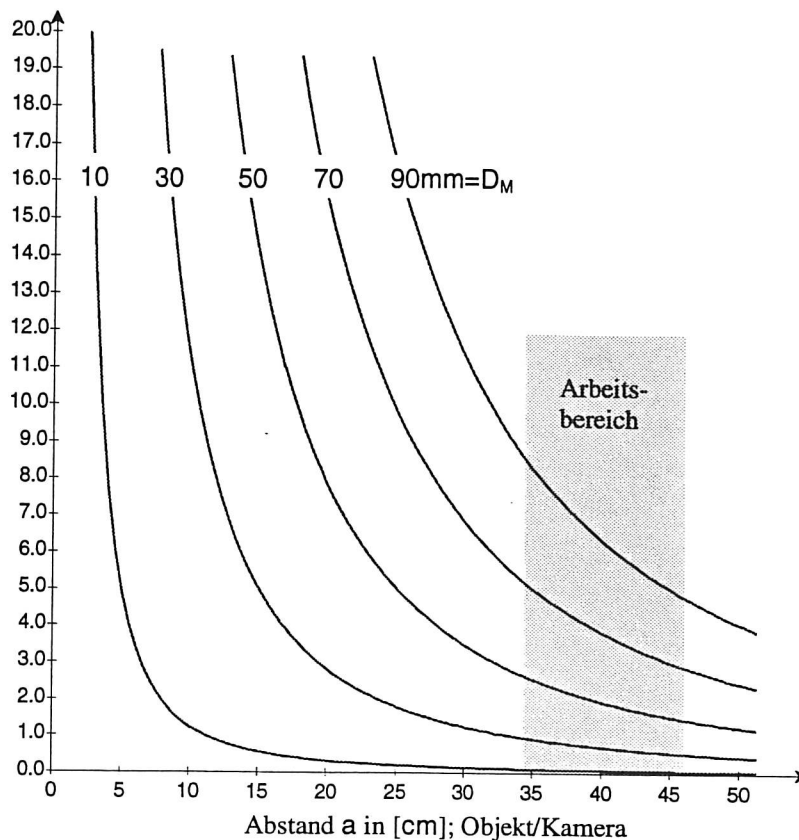


Bild 4.3.1.2.: Fehler in Abhängigkeit vom Abstand a mit D_M als Parameter

Im Arbeitsbereich des verwendeten Makroobjektivs liegt der Fehler unter 8‰ und kann somit gegenüber Meßungenauigkeiten vernachlässigt werden. Der Fehler kann weiter verringert werden, wenn die Fotos mit Teleobjektiv aufgenommen werden.

Um vergleichbare Aufnahmen zu machen, muß man den Abstand, die Einstellung des Objektivs und den Vergrößerungsmaßstab konstant halten. Vor und nach dem Versuch aufgenommene Fotos lassen sich bei der Verwendung von Diapositiven übereinander projizieren. Maßstabsungenauigkeiten und Verzerrungen auf der Leinwand sind Probleme, die eine quantitative Bewertung der Verformungen erschweren.

Der Maßstab sollte mit Rücksicht auf die Bildschärfe möglichst groß gewählt werden, um eine feine Auflösung zu erhalten (0,1 mm).

Für die Aufnahmen wurde eine Spiegelreflexkamera mit 60mm Objektiv verwendet. Der vorhandene Autofokus ist bei den teildurchsichtigen Bauteilen aus Araldit-B nicht zu gebrauchen. Als Filmmaterial wurden 100ASA und 200ASA Diapositiv- und Negativ-Filme verwendet.

4.3.2. Abdruckverfahren

Das Anfertigen von Abdrücken ist ein schnelles Verfahren, um die Modelloberfläche vollständig abzuformen und die Konturen des Modells festzuhalten. Als Abdruckmasse wird das 2-Komponenten Silikon-Elastomer „Permagum“ der Firma ESPE verwendet. Der Abdruck wird in zwei Schritten erstellt (Doppelabdrucktechnik, siehe Anhang D), [2]:

- 1.) Mit Permagum in knetbarer Konsistenz (grün) wird ein Vorabdruck genommen. Dieser Abdruck kann Lücken aufweisen und dient als Stützform für den zweiten Abdruck.
- 2.) Mit Permagum in dünnflüssiger Konsistenz (rotbraun) wird der Vorabdruck ausgestrichen und dann nochmals abgeformt.

Der Negativabdruck ist hochgenau (0,05mm) und schwindet nur geringfügig (0,06% nach sieben Tagen). Die Auswertung des Negativabdrucks ist nicht immer sinnvoll, so daß dieser nochmals abgeformt werden muß, um einen Positivabdruck zu erhalten. Dabei verringert man die Genauigkeit um etwa die Hälfte.

Vorteilhaft ist die Möglichkeit, mit partiellen Abdrücken hohle Bauteile und Hinterschnidungen erfassen zu können.

Als Schnitte können Ebenen von besonderem Interesse herausgearbeitet werden.

Ein qualitativer Vergleich der abgeformten Konturen vor und nach dem Einfrierversuch ist leicht möglich. Eine quantitative Aussage ist schwer herauszumessen, weil das Abdruckmaterial im ausgehärteten Zustand, ähnlich Hartgummi, elastisch ist.

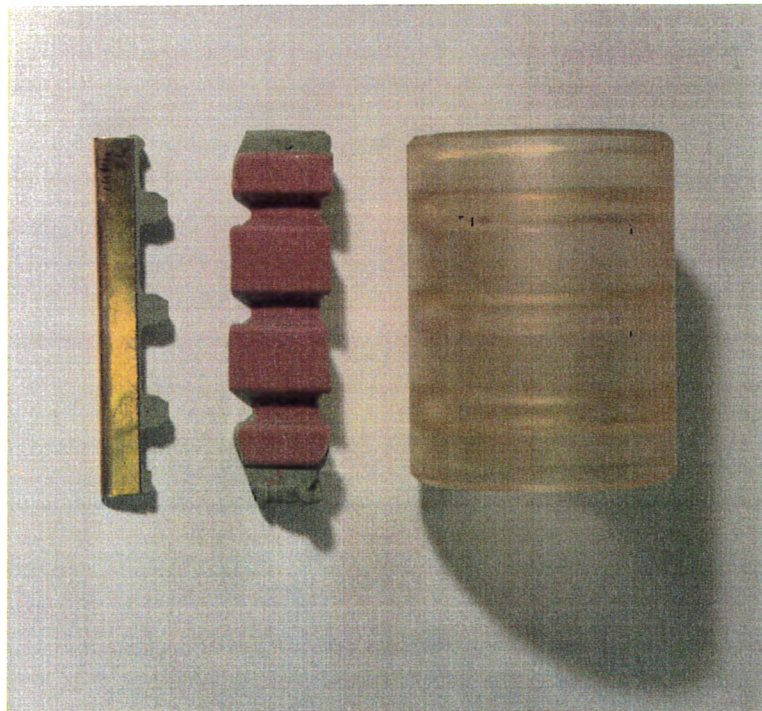


Bild 4.3.2.1.: Beispiel eines Abdrucks mit „Permagum“

4.3.3. Koordinatenmeßverfahren

Das genaueste Verfahren zur Formvermessung ist die Bestimmung von Koordinaten einzelner Punkte auf dem Modell. Dieses Verfahren ist das weitaus zeitaufwendigste und ermöglicht nur die Beobachtung einzelner ausgewählter Punkte auf der Außenkontur. Problematisch ist es, vermessene Punkte und deren Bezugssystem nach dem Einfrierversuch wiederzufinden.

Da die Einzelteile rotationssymmetrisch sind, wählt man die Symmetrieachse als Bezugssachse und richtet darauf ein Zylinderkoordinatensystem aus. Die Winkelaufteilung entspricht z.B. der Stundeneinteilung auf dem Zifferblatt einer Uhr.

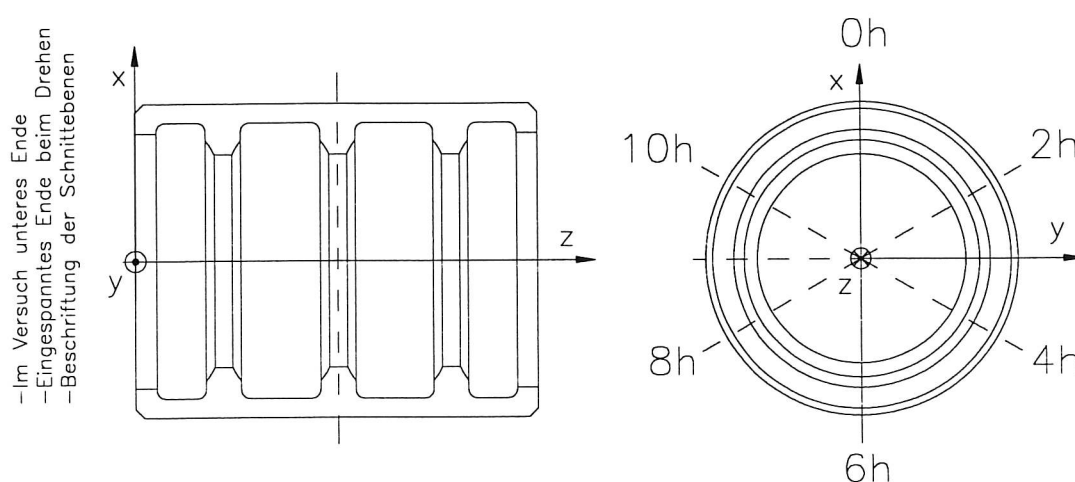


Bild 4.3.3.1. : Zylinderkoordinatensystem als Bauteilbezugssystem, Beispiel Spindelmutter

Von jedem Planeten wurden drei Schnittebenen vermessen: 0h-6h, 2h-8h, 4h-10h. Die Spindelstange wurde in den fünf Ebenen vermessen, in denen die Planeten angreifen (vor dem Einfrierversuch in drei Ebenen).

Die Messungen werden auf einer Universalfräsmaschine mit Meßoptik, eingespannt in die Werkzeugaufnahme, durchgeführt. Die Meßoptik besteht aus einem Mikroskop, in dessen Okular ein Fadenkreuz eingelegt ist. Mit Hilfe des Fadenkreuzes werden die zu messenden Konturpunkte mittels Handradsteuerung angefahren. Die Koordinaten relativ zu einem gewählten Bezugspunkt können am Steuerpult abgelesen werden.

Aus den Koordinaten lassen sich sämtliche Abmaße errechnen und vergleichen (siehe Anhang Meßprotokolle). Zur Berechnung und Darstellung wurden die Daten in das Tabellenkalkulationsprogramm Excel eingegeben. Verformungen wie Durchbiegung und Verlängerung lassen sich durch entsprechende Skalierung der Achse im Diagramm gut ablesbar darstellen.

Gibt man die Meßpunktkoordinaten in ein CAD-System ein, kann eine graphische Auswertung erfolgen. Die vor und nach dem Einfrierversuch aufgenommenen Meßwerte und die Sollkontur können überlagert dargestellt werden. Formfehler und Verformungen können bei starker Vergrößerung am Bildschirm oder auf einem Ausdruck leicht erkannt und ausgemessen werden. Eine Überhöhung der Verformungsdarstellung ist möglich, muß aber gegenüber der Meßungenauigkeit abgewogen werden.

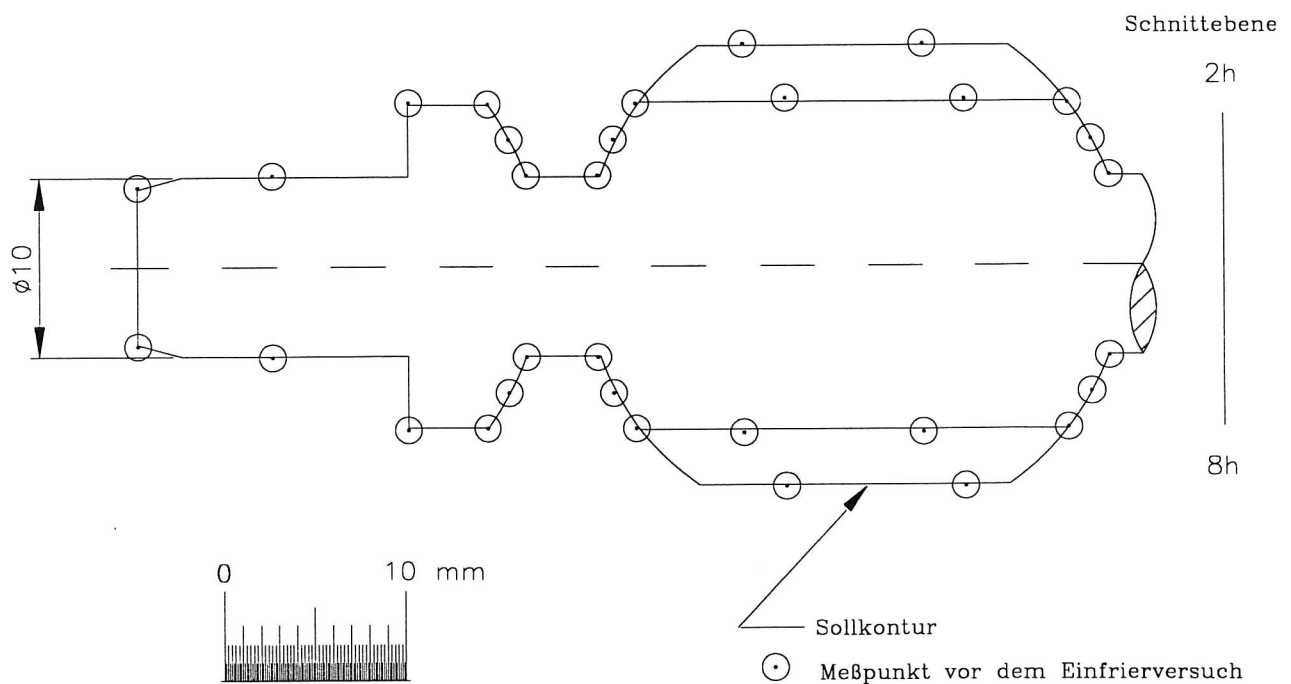


Bild 4.3.3.2.: Graphische Meßwertdarstellung; Beispiel: Planet 3, Schnitt 2h-8h

Die Meßoptik in Kombination mit der Fräsmaschine ermöglicht eine Meßauflösung von 0,01mm. Daraus ergibt sich, bezogen auf den kleinsten Durchmesser (10mm), ein relativer Fehler von 0,1%.

Die Verformungen im Einfrierversuch liegen im Bereich von wenigen Mikrometern, so daß die Auflösung dieses Verfahrens noch verfeinert werden muß (siehe folgendes Kapitel).

4.3.4. Profilprojektionsverfahren

Ein Profilprojektor erzeugt einen parallelen Strahlengang, in den das Meßobjekt gebracht wird, um den Schatten auf eine senkrecht zum Strahlengang stehende Ebene zu werfen.

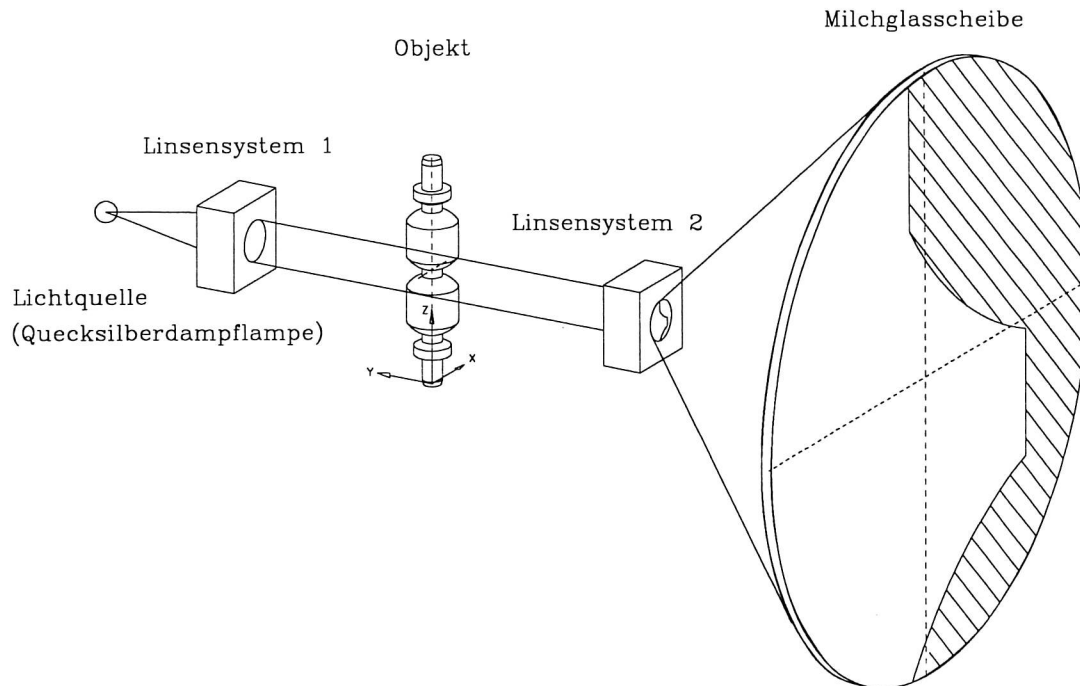


Bild 4.3.4.1.: Prinzipskizze der Profilprojektion mit parallelem Strahlengang

Der hier verwendete Profilprojektor dient ursprünglich zum Ausmessen von Fräswerkzeugen. Man erhält einen Ausschnitt der Außenkontur des Körpers in 20-facher Vergrößerung. Die Optik ist so ausgelegt, daß keine Verzerrungen auftreten. Beugungseffekte, wie Trennen der Spektralfarben, werden durch Verwendung von monochromatischem Licht einer Quecksilberdampf Lampe vermieden.

Mit dem Profilprojektor lassen sich zwei Verfahren zur Formvermessung vereinigen:

- Die auf die Mattscheibe projizierte Schnittkontur kann fotografiert, und wie im direkten fotografischen Verfahren ausgewertet werden. Der Vorteil dabei ist, daß man ein 20-fach vergrößertes und ebenes Bild als Vorlage hat. Fehler aus nichtparallelem Strahlengang treten nicht auf (siehe Kapitel 4.3.1.).

- Die Milchglasscheibe mit Optik und Lichtquelle sind parallel zur betrachteten Schnittebene in zwei Richtungen x und y verschiebbar. Mit Hilfe eines Fadenkreuzes auf der Milchglasscheibe und einer Koordinatenmeßeinrichtung kann man die x - und y -Koordinaten von Konturpunkten relativ zu einem gewählten Bezugspunkt bestimmen und abspeichern. Die Datei mit den Meßwerten wird im ASCII-Format (.txt) erstellt und kann mit Hilfe eines Übersetzungsprogramms (siehe Anhang Programme) in ein Graphikformat (.dxf) umgeschrieben werden. Die Auswertung der Koordinaten erfolgt im CAD-System (siehe Kapitel 4.3.3.). Die Auflösung dieses Verfahrens ist sehr hoch (0,005mm). Der relative Fehler, bezogen auf den kleinsten Bauteildurchmesser (10mm), beträgt 0,05%. Liegen die zu messenden Verformungen über 0,02mm, erhält man einen relativen Fehler, der geringer als 25% ist.

Die verwendete Lichtquelle strahlt eine hohe Lichtintensität aus, so daß man bei Tageslicht arbeiten kann. Die damit verbundene Wärmestrahlung bewirkt einen Wärmeeintrag in die untersuchten Bauteile aus Araldit-B. Da der Wärmeausdehnungskoeffizient von Araldit-B relativ groß (0,00018/K) ist, sind die Wärmedehnungen von meßbarer Größe. Es ist also bei der Messung darauf zu achten, daß die Bauteile nur kurzzeitig belichtet und Wartezeiten zur Abkühlung eingehalten werden. Alternativ kann man auch eine aktive Kühlung vorsehen und die Bauteile im Temperaturgleichgewicht halten.

4.4. Spannungsoptik

4.4.1. Spannungsoptischer Effekt

Unter dem spannungsoptischen Effekt versteht man die Interferenzerscheinungen, die in einem verformten Modell aus spannungsdoppelbrechendem Material, mit einer geeigneten Apparatur beobachtet werden können.

Beschreibung der Interferometrie durch Spannungsdoppelbrechung mit dem **Brewster'schen** (auch Maxwell-Wertheim'sches genanntes) **Gesetz**:

Ein Lichtvektor A wird in Komponenten nach den beiden Hauptspannungsrichtungen zerlegt. Für die Komponenten A_1 und A_2 gelten im ebenen verspannten Modell verschiedene Brechungsindizes n_1 und n_2 , deren Abweichung gegenüber dem Brechungsindex n_0 des unverspannten Modells den Hauptspannungen σ_1 und σ_2 proportional sind:

$$\begin{aligned} n_1 - n_0 &= C_1 \cdot \sigma_1 + C_2 \cdot \sigma_2 \\ n_2 - n_0 &= C_1 \cdot \sigma_2 + C_2 \cdot \sigma_1 \end{aligned}$$

- C_1, C_2 Materialkonstanten
 n_0 Brechungsindex in verformungsfreiem Material
 n_1 Brechungsindex in Richtung der ersten Hauptspannung
 n_2 Brechungsindex in Richtung der zweiten Hauptspannung
 σ_1 erste Hauptspannung
 σ_2 zweite Hauptspannung

Formel 4.4.1.1.: Differenz der Brechungsindizes proportional zu den Hauptspannungen, [3]

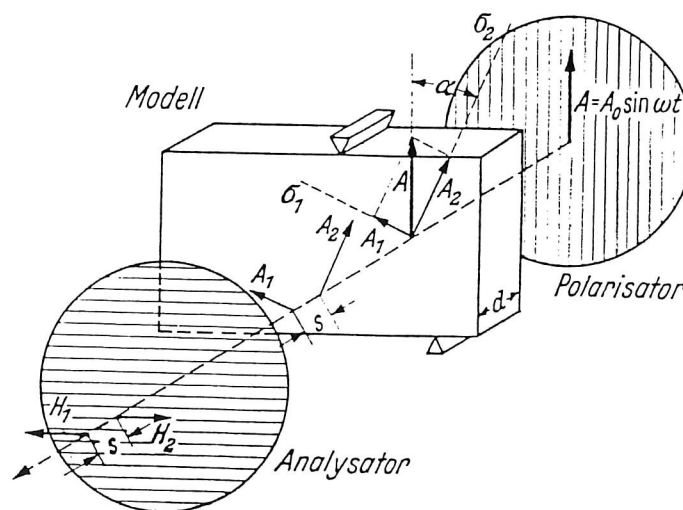


Bild 4.4.1.1.: Vektorielle Zerlegung eines linear polarisierten Lichtstrahls bei Dunkelfeldanordnung, [3]

Aus diesem Ansatz läßt sich die **spannungsoptische Grundgleichung** herleiten:

$$\delta = \frac{c}{\lambda} \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot d = f_\sigma \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot d$$

- c Lichtgeschwindigkeit
- d Länge des Lichtweges durch das Modell
- f_σ spannungsoptische Konstante
- δ Gangunterschied
- λ Wellenlänge
- $(\sigma_1 - \sigma_2)$ Differenz der Hauptspannungen in der betrachteten Ebene

Formel 4.4.1.2.: Spannungsoptische Grundgleichung, [3]

Die Differenz der Hauptspannungen ergibt den Gangunterschied der Komponenten A_1 und A_2 . Für ganzzahlige Gangunterschiede löschen sich die Komponenten im zweiten Polarisationsfilter („Analysator“) aus. Die auf dem Modell erscheinenden dunklen Linien heißen „Isochromaten“ und bedeuten Linien gleicher Hauptspannungsdifferenz $(\sigma_1 - \sigma_2)$ bzw. gleichen Gangunterschiedes.

Bei linear polarisiertem Licht, wie man es im Aufbau nach Bild 4.4.1.1. erhält, erscheinen dort ebenso dunkle Linien („Isoklinen“), wo die Hauptspannungen die gleiche Richtung wie der erste Polarisationsfilter („Polarisator“) aufweisen. Der Lichtvektor spaltet sich im Modell nicht in zwei Komponenten, die bestehende Komponente wird aber im Analysator vollständig absorbiert.

Isoklinen sind in den hier durchgeführten Versuchen nicht von Nutzen. Verwendet man zirkular polarisiertes Licht, treten keine Isoklinen auf, die Isochromaten bleiben unverändert. Der Aufbau wird durch zwei $\lambda/4$ -Wellenplatten ergänzt:

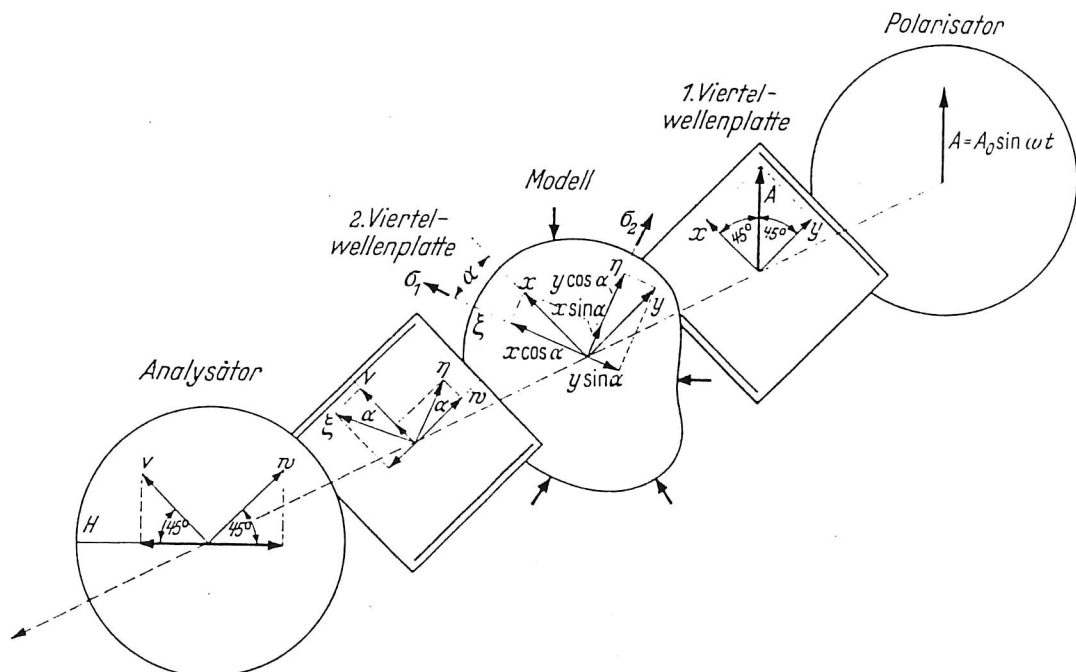


Bild 4.4.1.2.: Vektorielle Zerlegung eines zirkular polarisierten Lichtstrahls bei Dunkelfeldanordnung, [3]

Am Beispiel des Biegebalkens kann man die Isochromaten gut erkennen. Die Isochrone 0. Ordnung liegt in der Mittel- oder neutralen Faser. Zu den Rändern hin steigt die Hauptspannungsdifferenz und die Ordnung der Isochromaten linear an. Die Isochromaten bilden sich in gleichen Abständen aus. Poly- und monochromatisches Licht ergeben die gleichen Isochromaten. Bei polychromatischem Licht ist die Trennung nach Wellenlängen zu beobachten, so daß Isochromaten höherer Ordnung nicht mehr schwarz sind, sondern das Farbspektrum des Lichtes zeigen. Liegen die Isochromaten eng nebeneinander, vermischen sich die Farben und eine Unterscheidung wird unmöglich.

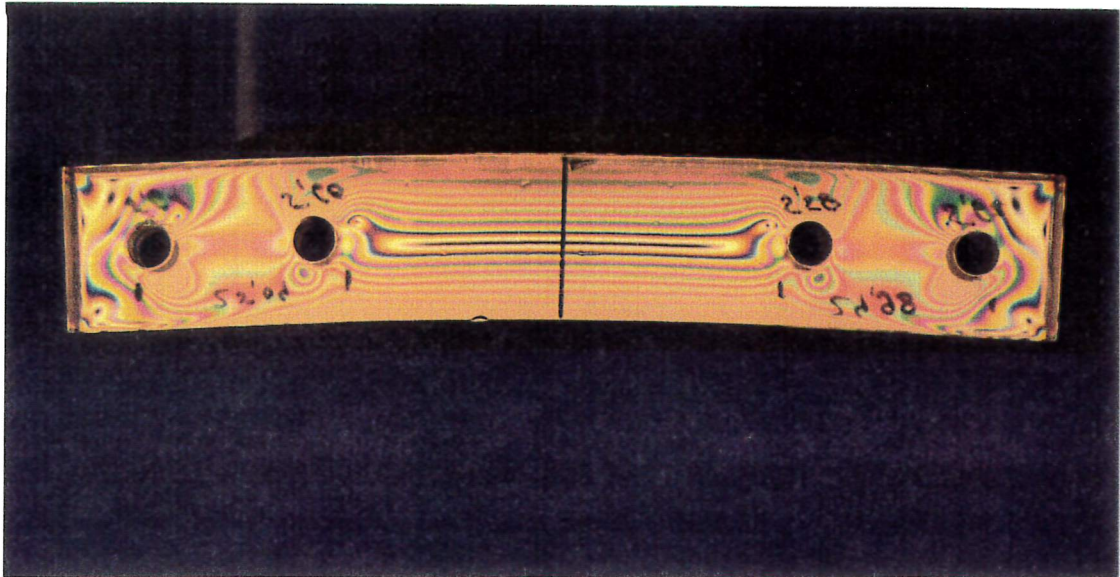


Bild 4.4.1.3.: Biegebalken unter konstantem Biegemoment in polychromatischem Licht (weiß)

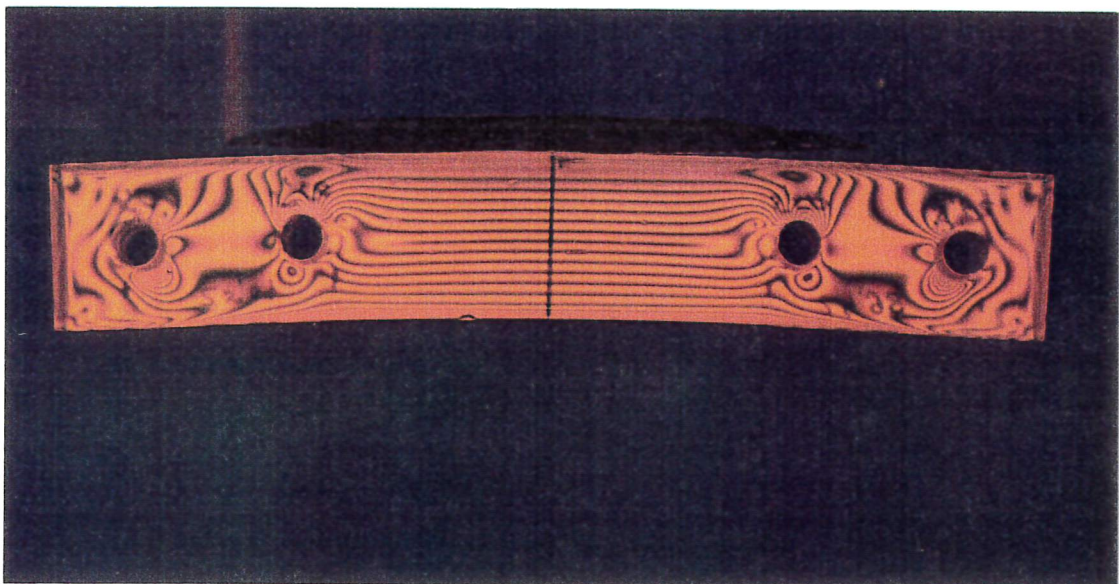


Bild 4.4.1.4.: Biegebalken unter konstantem Biegemoment in monochromatischem Licht (Na-Licht)

4.4.2. Spannungsoptischer Einfrierversuch

Mit dem Einfrierversuch lassen sich Spannungszustände in Modellen aus geeigneten spannungsoptisch aktiven Materialien festhalten. Geeignete Materialien sind Kunststoffe, die durch Erwärmung in den hochelastischen gummiartigen Zustand übergehen und einen aufgeprägten Verformungs- bzw. Spannungszustand nach Abkühlung beibehalten. Man kann sich dieses Verhalten vorstellen, wie das eines Schwammes, dessen Hohlräume mit Wachs gefüllt sind. Bei Erwärmung wird das Wachs flüssig. Eine Verformung bewirkt Spannungen im Schwammmaterial. Dieser Zustand wird festgehalten, wenn man langsam abkühlt und das Wachs erstarrt [3].

Der Vorteil im Einfrierverfahren liegt darin, daß man ein derartig behandeltes Modell mit eingefrorenen Spannungen in beliebig dünne Schichten schneiden kann, die den Spannungszustand unverändert zu erkennen geben. 3-dimensionale komplexe Geometrien und Spannungszustände lassen sich schichtweise analysieren. Wählt man bei mehreren identischen Modellen sämtliche Schnittrichtungen, kann man sich ein komplettes Bild des 3-dimensionalen Spannungszustandes zusammensetzen.

Für den spannungsoptischen Einfrierversuch ist heißhärtendes Epoxidharz besonders gut geeignet. Die Temperaturkurve im Einfrierversuch mit Araldit-B (Werkstoffblatt siehe Anhang D.) hat folgenden Verlauf:

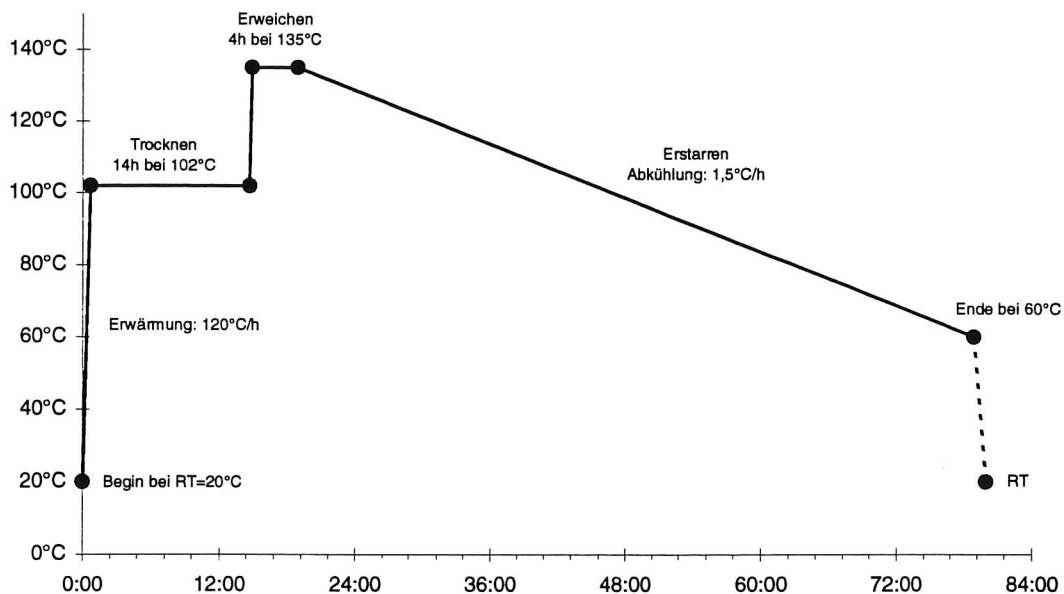


Bild 4.4.2.1.: Temperaturverlauf für den Einfrierversuch mit Araldit-B

Trocknen: Araldit-B ist ein Epoxidharz mit hygroskopischem Verhalten. Wasser, das während der Bearbeitung und der Lagerzeit von Herstellung der Bauteile bis zum Einfrierversuch in die Randschicht eindiffundiert ist, bewirkt durch die Volumenzunahme Druckeigenstressungen und muß oberhalb der Siedetemperatur ausgetrieben werden. Für die Trocknungsdauer gilt nach Abschätzung der Eindiffusion bei Raumtemperatur:

5 Tage lagern \approx 1h trocknen

Erweichen: Bei ca. 125°C fällt der E-Modul auf 1/150 seines Wertes bei Raumtemperatur. Eine zuvor entsprechend ausgelegte Belastung führt nun zu Verformungen im elastischen Bereich.

Erstarren: Die Verformungen werden durch langsames Abkühlen (1-4°C/h) eingefroren. Bei dicken Modellen muß langsamer abgekühlt werden, um das Einfrieren von Wärmespannungen zu vermeiden. Ist die Temperatur auf 60°C abgesunken, kann man das Modell aus dem Ofen entnehmen und in Umgebungsluft auf Raumtemperatur abkühlen lassen, ohne den Spannungszustand zu verfälschen.

4.4.3. Polariskop

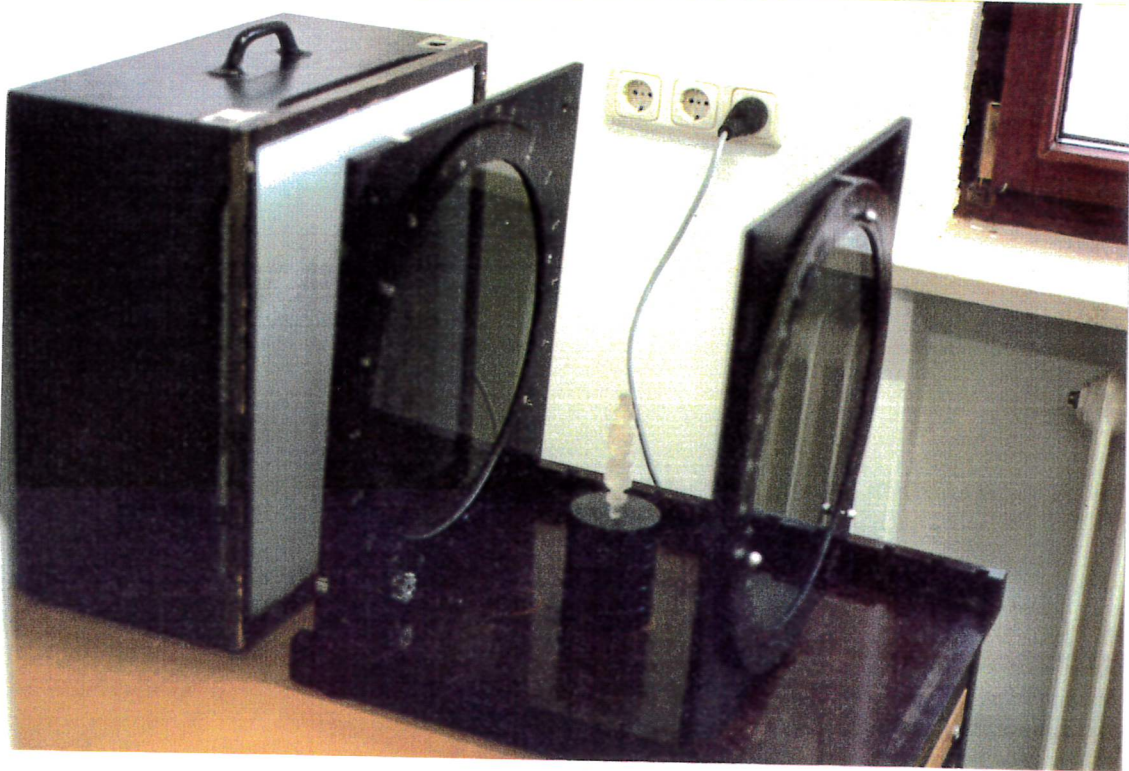


Bild 4.4.3.1.: Aufbau eines Polariskopes [Leihgabe der TUM]

Der Aufbau, mit dem man das spannungsoptische Modell untersucht, wird Polariskop genannt. Er besteht aus einer Lichtquelle mit wahlweise Na-Dampflampen und/oder weißen Lampen. Das Licht passiert zwei Polfilter, die jeweils mit $\lambda/4$ -Wellenplatten kombiniert sind. Die Polfilter und $\lambda/4$ -Wellenplatten sind in den Rahmen drehbar gelagert, so daß man zirkuläre Polarisation erzeugen kann (siehe Kapitel 4.4.1.). Zwischen dem ersten Polfilter mit $\lambda/4$ -Wellenplatte (Polarisator) und dem zweiten (Analysator) befindet sich der Modellraum. Der Betrachter kann das Modell beliebig ausrichten und mit bloßem Auge untersuchen.

Zum Festhalten der spannungsoptischen Bilder benutzt man einen Photoapparat mit Stativ und Teleobjektiv (hier Normalobjektiv). Der Abstand sollte groß sein (1-2m), um einen quasiparallelen Strahlengang zu erhalten. Die Blende ist möglichst weit zu schließen, damit gute Tiefenschärfe gewährleistet ist. Ein Autofokus ist bei dem teildurchsichtigen Modell nicht einsetzbar.

4.4.4. Apparatur zur Wärmebehandlung



Bild 4.4.4.1.: Apparatur zur Wärmebehandlung

Für den spannungsoptischen Einfrierversuch benötigt man eine Einrichtung, die es erlaubt, einen exakten Temperaturverlauf über der Zeit zu fahren.

Zur Verfügung steht ein Temperaturschrank der Firma Heraeus mit folgender Leistungskurve:

Temperaturänderungsgeschwindigkeit

Temperature change rate during

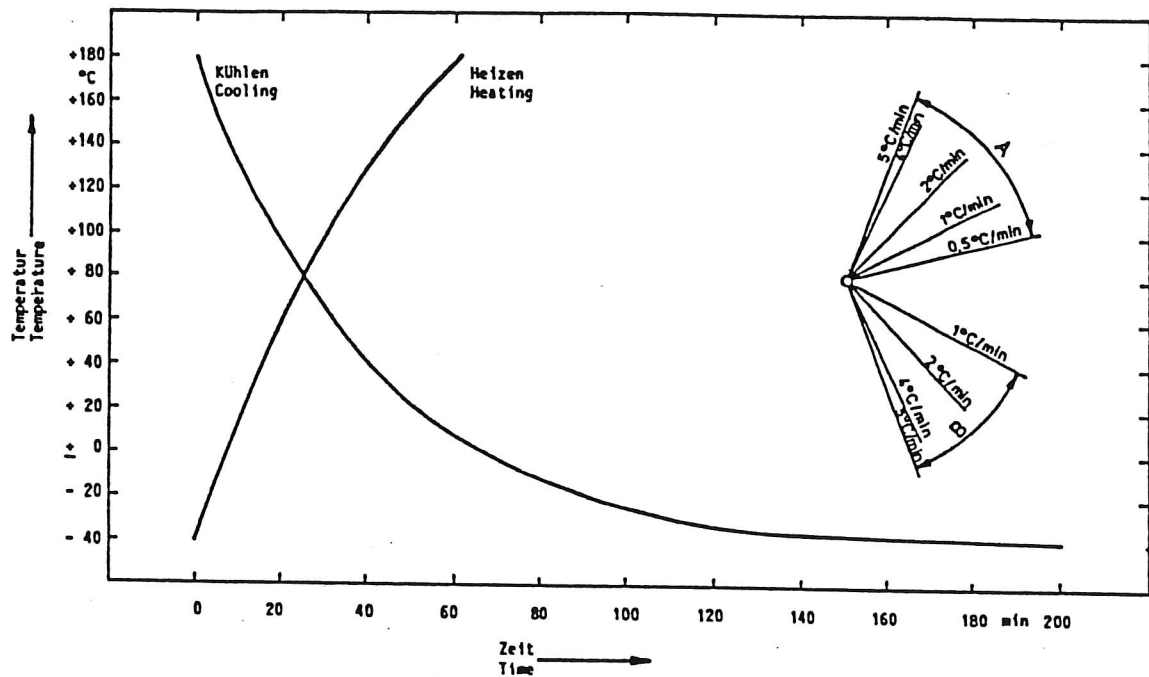


Bild 4.4.4.2.: Leistungskurve des Temperaturschranks, [4]

Über eine am Ofen installierte RS 232 Schnittstelle ist ein PC zur Steuerung angeschlossen. Das Steuerprogramm (siehe Anhang Programme) wurde in Turbo-Pascal erstellt und ermöglicht einen vollautomatischen Ablauf der für den Einfrierversuch gewünschten drei Phasen: Trocknen, Erweichen und Erstarren.

4.5. Numerische Modelle

Numerische Modelle stützen sich in ihrem Ansatz auf Grundgleichungen der Mechanik, meist Differentialgleichungen, und in der Lösung auf Approximationsverfahren aus der numerischen Mathematik.

Die Finite Elemente Methode (FEM) ist das bekannteste und am weitesten verbreitete numerische Verfahren. Es können sowohl statische und dynamische Probleme, als auch geometrisch oder physikalisch nichtlineare Aufgaben gelöst werden. Eine Beschreibung des Verfahrens ist in der dazu zahlreich existierenden Literatur nachzulesen, z.B. [5].

Die Genauigkeit der FEM ist hauptsächlich von der Größe und Art der Elemente, in die der betrachtete Körper diskretisiert wird, abhängig. Es existieren jedoch Probleme, bei denen die FEM bei noch so feiner Diskretisierung zu ungenauen Ergebnissen führt oder der Rechenaufwand sehr groß wird. In solchen Fällen kann es sinnvoll sein, andere Verfahren anzuwenden, die auf Integralgleichungen basieren, wie z.B. die Rand-Elemente-Methode (Boundary Element Method, BEM, [5]). Die Differentialgleichung des Problems wird in eine Integralgleichung transformiert, die auf der Oberfläche oder der Randlinie definiert ist. Die Lösung der Integralgleichung ist in der Regel analytisch nicht zu bestimmen, so daß eine Diskretisierung der Integralgleichung erfolgen muß und die Lösungen durch numerische Verfahren ermittelt werden.

Die BEM benötigt im Allgemeinen nur eine Oberflächendiskretisierung und verringert somit die räumliche Dimension des Problems, auch das zu lösende Gleichungssystem wird kleiner als bei der FEM. Beeinflusst wird der Vorteil durch das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen. Änderungen der Diskretisierung sind nicht so zeitaufwendig und die Abweichung von der exakten Lösung ist sogar kleiner.

Die exakte Lösung für die Spannungsverteilung und die Verformungen in der PWG ist analytisch nicht bestimmbar. Ein spannungsoptisches Modell kann eine annähernd exakte Lösung bei der Betrachtung von statischen Lasten liefern, die für numerische Methoden eine Hilfestellung zur Diskretisierung bietet und zur Kontrolle der Ergebnisse dienen kann. Insbesondere bei der BEM ist ein direkter Vergleich von Isochromatenaufnahme des spannungsoptischen Modells mit dem Lösungsansatz und Oberflächendiskretisierung möglich.

Softwareunterstützung zur Durchführung der numerischen Simulation bieten die vorhandenen Programme ANSYS und SIMPACK. Diese Programme ermöglichen die Untersuchung der PWG unter statischen, quasistatischen und dynamischen Lasten. Die Geometrie der PWG ist aber komplex, so daß man die PWG nicht im Ganzen erfassen kann. Man wird das Problem der Kontaktpunkte getrennt von dem Problem der „globalen“ Verformungen behandeln müssen. Zum Einstieg wird man die Geometrie auf den ebenen Fall reduzieren, indem man einen Schnitt durch die Kontaktpunkte eines Planeten legt.

5. Versuche

5.1. Kalibrierversuch, Systemtest

Die Werkstoffkennwerte von Araldit-B, die für die Auslegung und Auswertung des Einfrierversuchs notwendig sind, werden in einem Vorversuch ermittelt. Der sogenannte Kalibrierversuch muß exakt gleich dem Einfrierversuch mit dem PWG-Modell ablaufen. Gleichzeitig dient der Vorversuch als Testlauf für die Geräte und Hilfsmittel.

Aufbau und Auslegung

Der Biegebalken aus Araldit-B mit bekanntem konstanten Momentenverlauf ermöglicht die Berechnung der spannungsoptischen Konstanten f_{σ} und des Elastizitätsmoduls E im Einfrierversuch:

$$E = \frac{3}{2} \cdot \frac{M \cdot l^2}{d \cdot h^3 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta)^2} \cdot \frac{1}{w}$$

- d Dicke des Biegebalkens
- E Elastizitätsmodul
- h Höhe des Biegebalkens
- l Länge des betrachteten durchgebogenen Balkenabschnitts
- M Biegemoment
- w Durchbiegung bzw. max. Absenkung in der Balkenmitte
- α Wärmeausdehnungskoeffizient; $0,00018 \text{ K}^{-1}$
- $\Delta\vartheta$ Temperaturdifferenz; Erstarrungstemp. - RT $\approx 100\text{K}$

Formel 5.1.1.: Berechnung des E-Moduls aus der Durchbiegung des Balkens, [3]

$$f_{\sigma} = 12 \cdot \frac{M}{h^2 \cdot z \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta)^2}$$

- f_{σ} spannungsoptische Konstante
- z Anzahl der Isochromaten über die gesamte Balkenhöhe

Formel 5.1.2.: Berechnung der spannungsoptischen Konstanten nach Abzählen der Isochromaten, [3]

In den obigen Formeln werden Faktoren zur Berücksichtigung der Wärmedehnungen eingeführt, die in der angegebenen Literaturquelle nicht zu finden sind.

Für die Konstruktion des Aufbaus im Kalibrierversuch gelten folgende Kriterien:

- Der Biegemomentenverlauf muß im betrachteten Balkenabschnitt konstant sein.
- Störeinflüsse durch Torsion-, Zug- oder Druckspannungen und schiefe Biegung müssen ausgeschlossen sein. Biegemoment aus Eigengewicht sollte kompensiert werden, wenn relevant.
- Die Größe des Biegemoments muß einstellbar sein.
- Der Bereich der Momenten- bzw. Krafteinleitung in den Biegebalken muß klein sein und der Werkstoff darf punktuell nicht überlastet werden.

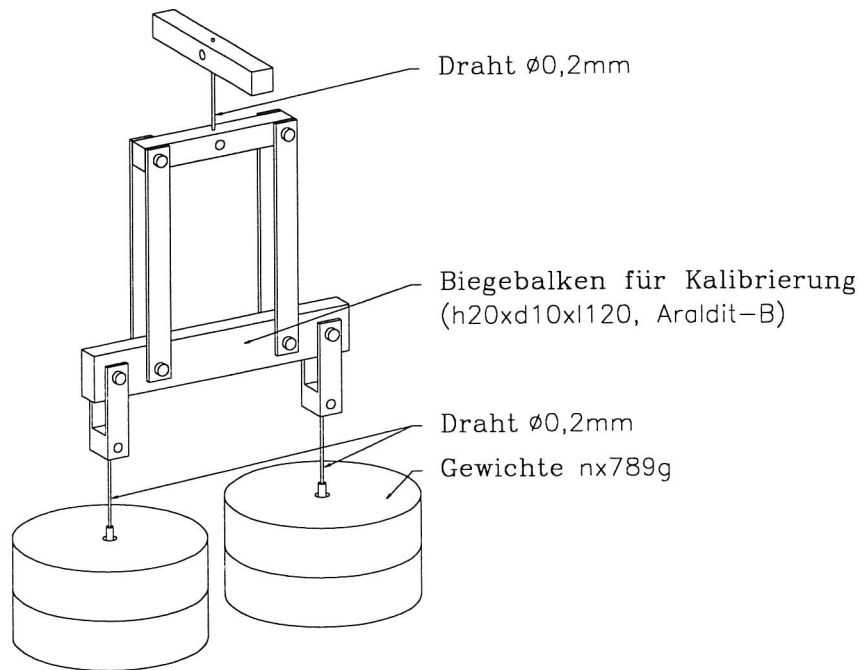


Bild 5.1.1.: Aufbau für Kalibrierversuch (Zeichnungen siehe Anhang)

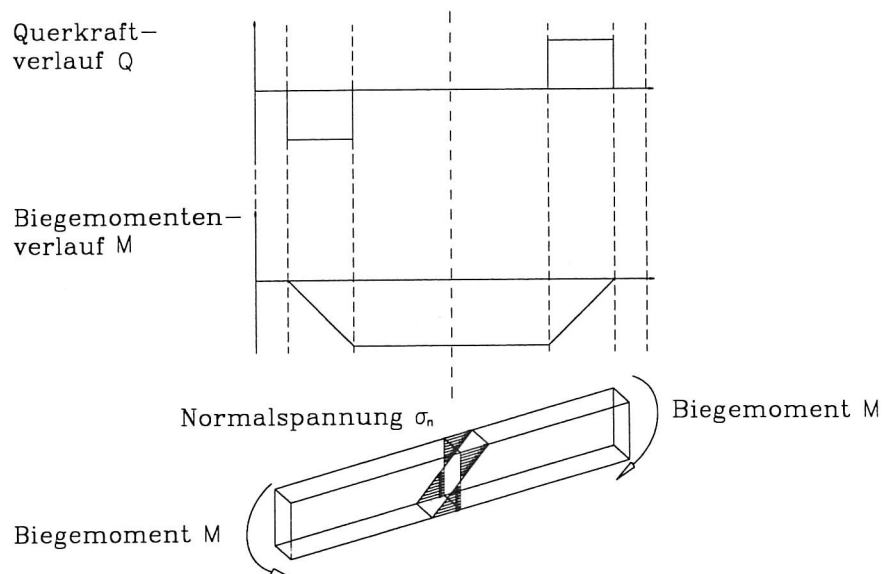


Bild 5.1.2.: Schnittgrößen und idealisierte Normalspannung im Biegebalken des Kalibrierversuchs

Annahmen laut Literatur :

$$E = 180 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} = 17,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$f_{\sigma} = 0,26 \frac{\text{kp}}{\text{cm-Ordnung}} = 0,255 \frac{\text{N}}{\text{mm-Ordnung}}$$

Gewünschte Isochromatendichte: $2 \frac{\text{Ordnungen}}{\text{mm}} \rightarrow z = 40 \rightarrow \delta = 20$

Zu erzeugende maximale Spannung: $\sigma = \frac{\delta}{d} \cdot f_{\sigma} = 0,38 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Normalspannung aus Biegemoment:

$$\sigma_n = \frac{M}{J} \cdot \frac{h}{2} = 6 \cdot \frac{m \cdot g \cdot a}{d \cdot h^2}$$

J Flächenträgheitsmoment
m Masse der Gewichte
g Erdbeschleunigung
a Hebelarm

Formel 5.1.3.: Maximale Normalspannung an Balkenoberseite und Balkenunterseite

Gleichsetzen der Spannungen: $\sigma \equiv \sigma_n$

Anzuhängende Massen: $m = \frac{\delta}{d} \cdot f_{\sigma} \cdot \frac{1}{6} \cdot \frac{d \cdot h^2}{g \cdot a} = 17 \text{ kg}$

Tatsächlich angehängte Massen: $m = 1,61 \text{ kg}$

Abschätzung der Durchbiegung: $w = \frac{3}{2} \cdot \frac{M \cdot l^2}{E \cdot d \cdot h^3} \approx 0,3 \text{ mm}$

Messung der Durchbiegung vor der Belastung im Kalibrierversuch

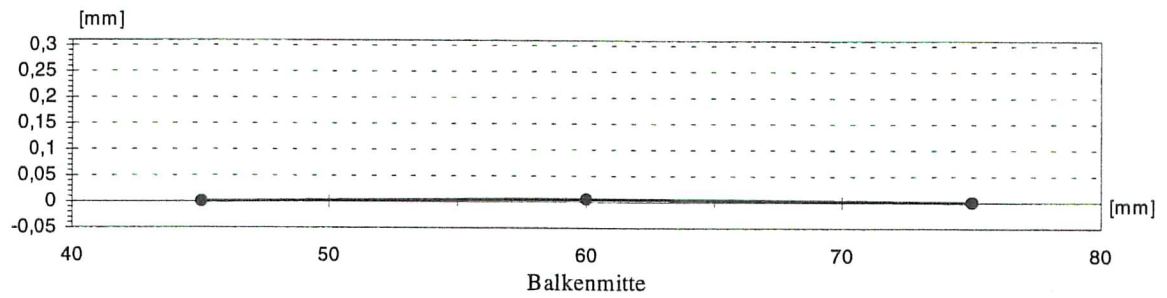


Bild 5.1.3.: Durchbiegung des Biegebalkens vor dem Kalibrierversuch

Durchführung des Kalibrierversuchs

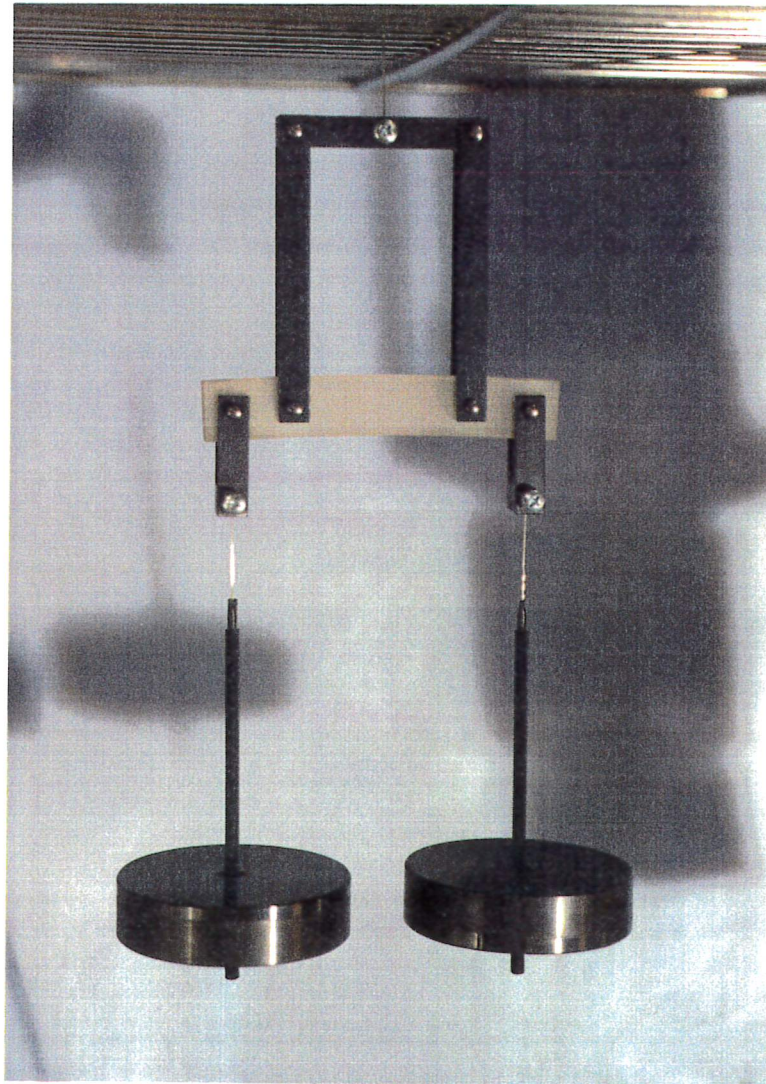


Bild 5.1.4.: Kalibrierversuch

Messung der Durchbiegung nach der Belastung im Kalibrierversuch

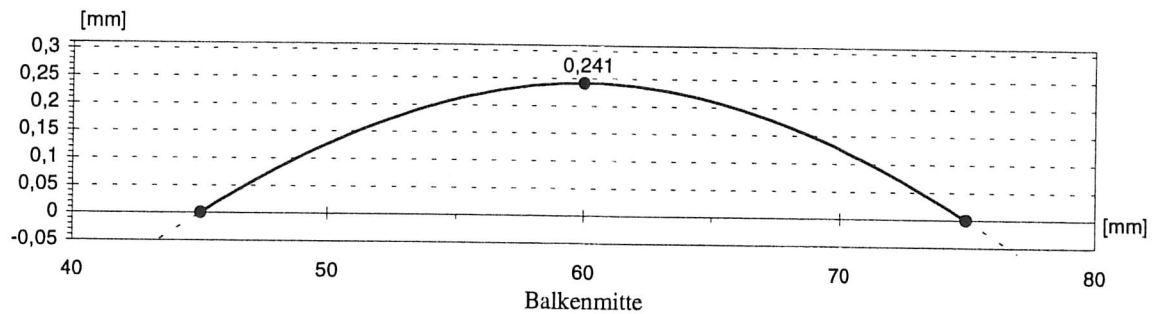


Bild 5.1.5.: Durchbiegung des Biegebalkens nach dem Kalibrierversuch

Der Mittelwert der Durchbiegung an Ober- und Unterseite ergibt: 0,241mm. Daraus errechnet sich der E-Modul zu:

$$E = 21,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Spannungsoptische Auswertung im Polariskop

Die Isochromatenordnung wird mit Hilfe der Fotos vom Biegebalken im Polariskop ausgezählt und zum Rand hin extrapoliert. Zur Auswertung wurden 5mm und 2mm dicke Schnitte aus dem Balken herausgearbeitet.

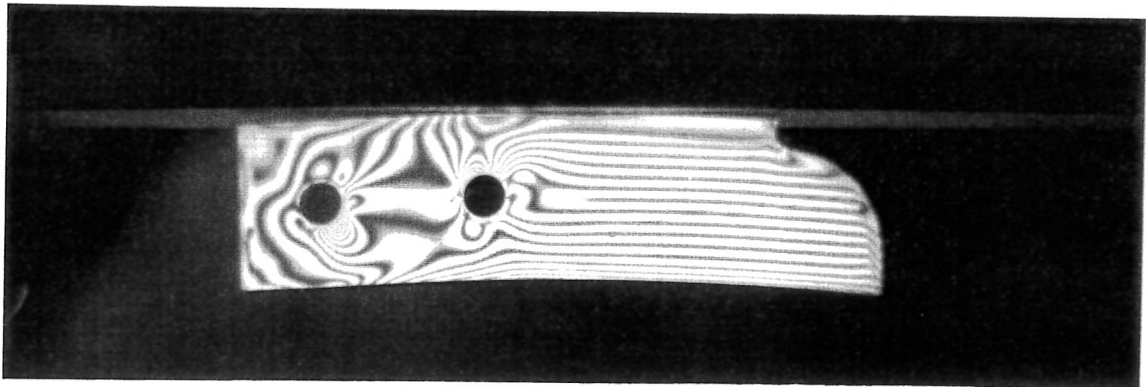


Bild 5.1.6.: Isochromaten im Biegebalken (d=5mm) in monochromatischem Na-Licht

In der Vergrößerung (siehe Anhang) läßt sich die Anzahl der Isochromaten auf $z_{d5} = 15,0$ bestimmen. Daraus berechnet sich für $f_{\sigma;d5}$:

$$f_{\sigma;d5} = 0,307 \frac{\text{N}}{\text{mm-Ordnung}}$$

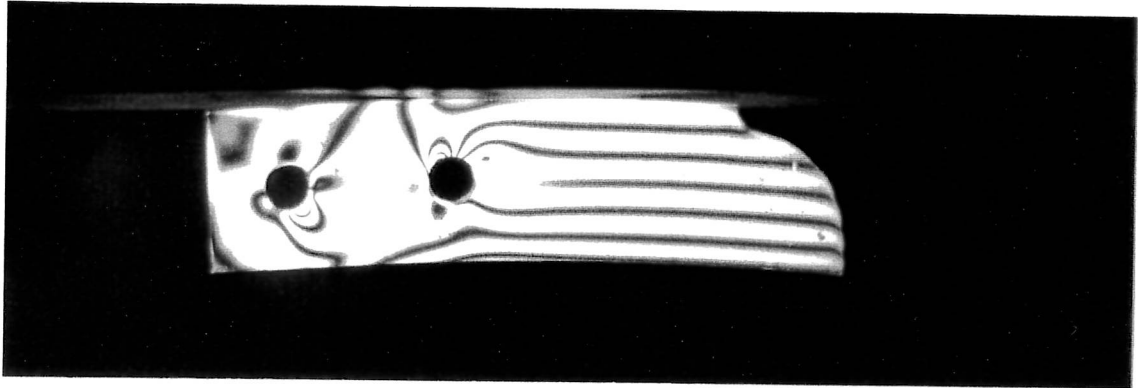


Bild 5.1.7.: Isochromaten im Biegebalken ($d=2\text{mm}$) in monochromatischem Na-Licht

$$\rightarrow z_{d2} = 5,86 \quad \rightarrow \quad f_{\sigma;d2} = 0,314 \frac{\text{N}}{\text{mm-Ordnung}}$$

Der Mittelwert der Spannungsoptischen Konstanten für das hier verwendete Araldit-B ergibt sich zu:

$f_{\sigma} = 0,31 \frac{\text{N}}{\text{mm-Ordnung}}$
--

5.2. Spannungsoptisches Modell im Einfrierversuch

Aufbau und Auslegung

Das Modell der PWG wurde aus Araldit-B im Maßstab 5:1 gefertigt. Die Abmessungen des Originals sind zu klein für eine spannungsoptische Auswertung.

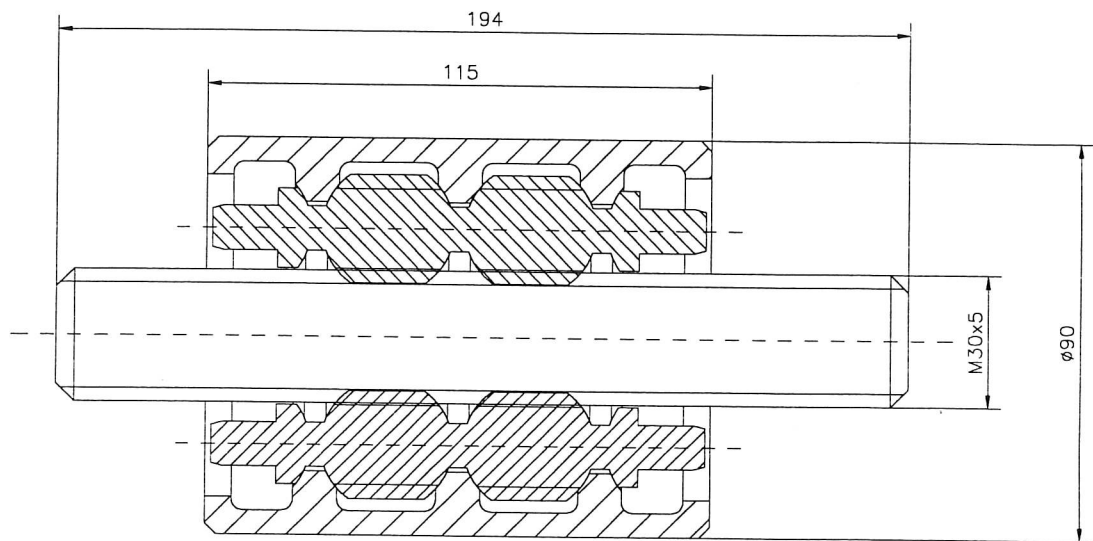


Bild 5.2.1.: Hauptabmessungen des PWG Modells

Das Original der PWG besteht aus unterschiedlichen Kunststoffen mit verschiedenen E-Modulen. Zur Auslegung der Belastung des Modells wird der E-Modul und die Dehnung der Spindelstange herangezogen. Die verschiedenen E-Module werden nicht nachgebildet. Die Spindelstange, im Original aus Polyamid, hat einen E-Modul zwischen 2000N/mm^2 und 3500N/mm^2 . Als maximale axiale Betriebslast wird $F=60\ldots 100\text{N}$ angegeben. Bei höherer Last wird der Schlupf der Spindel so groß, daß die Translationsgeschwindigkeit bzw. die Übersetzung zu Null wird.

Eine Übersicht über die Kenngrößen von Modell und Original gibt folgende Tabelle:

	Modell	Original
Maßstab:	5 : 1	
Kontaktgeometrien:		
- Spindelstange:	Metrisches Gewinde M30x5	Metrisches Gewinde M6x1
- Planeten: spindelstangenseitig:	Gewinde, Steigung $= -5 \text{ mm}/U_{\text{mdr.}}$ konvexe Flanken $R=7,5\text{mm}$	Gewinde, Steigung $= -1 \text{ mm}/U_{\text{mdr.}}$ konvexe Flanken $R=1,5\text{mm}$
mutterseitig:	Ringnuten, konvexe Flanken $R=15\text{mm}$	Ringnuten, konvexe Flanken $R=3\text{mm}$
- Mutter:	Ringförmige Stege, konkave Flanken $R=20\text{mm}$	Ringförmige Stege, konkave Flanken $R=4\text{mm}$
\Rightarrow Gesamtsteigung:	$S_{\text{ges}} = 0,85 \text{ mm}/U_{\text{mdr.}}$	$S_{\text{ges}} = 0,17 \text{ mm}/U_{\text{mdr.}}$
Drehzahlbereich:	im Versuch: $n = 0 \text{ } U_{\text{mdr.}}/\text{min}$	$n = 2000 \rightarrow 5000 \text{ } U_{\text{mdr.}}/\text{min}$
Max. axiale Last: Drehmoment:	im Versuch: $F_{\text{axial}} = 18,2 \text{ N}$ im Versuch: $M = 0 \text{ Nmm}$	$F_{\text{axial}} = 60 \rightarrow 100 \text{ N}$ $M = 1,6 \rightarrow 2,7 \text{ Nmm}$
Selbsthemmung:	Ja	Ja
Material, E-Modul:		
- Spindelstange:	Araldit-B, Kalibrierversuch: $E = 21,5 \text{ N}/\text{mm}^2$	PA 66: $E = 2000 \rightarrow 3500 \text{ N}/\text{mm}^2$
- Planeten:	Kalibrierversuch parallel PWG: $E = 21,0 \text{ N}/\text{mm}^2$	* PA 66: $E = 2000 \rightarrow 3500 \text{ N}/\text{mm}^2$ * Vectra: $E \approx 14000 \text{ N}/\text{mm}^2$ * Ryton: $E \approx 6100 \text{ N}/\text{mm}^2$
- Mutter:		Polyacetal (POM): $E = 2800 \rightarrow 3200 \text{ N}/\text{mm}^2$
- Führungsringe:		PA 66: $E = 2000 \rightarrow 3500 \text{ N}/\text{mm}^2$
Spannungsoptische Konstante:	Kalibrierversuch: $f_{\sigma} = 0,31 \text{ N}/\text{mm Ordnung}$ Kalibrierversuch parallel PWG: $f_{\sigma} = 0,306 \text{ N}/\text{mm Ordnung}$	

Bild 5.2.2.: Übersicht über die Kenngrößen von Modell und Original

Für das PWG-Modell soll im Einfrierversuch gelten:

$$\varepsilon'_{\text{Modell}} \equiv \varepsilon_{\text{Original}}$$

Formel 5.2.1.: Bedingung für die Dehnungen im Versuchsmodell

Es ergibt sich für die Belastung des Modells:

mit $\sigma = E \cdot \varepsilon$ und $\sigma = \frac{F}{A}$

folgt: $F' = \frac{A'}{A} \cdot \frac{E'}{E} \cdot F = 9,5 \dots 27,8 \text{ N}$

$$\frac{A'}{A} = 25; \quad \frac{E'}{E} = 0,0111 \dots 0,00634; \quad F = 60 \dots 100 \text{ N}$$

Gewählte Last für Einfrierversuch:

$$F' = 18,2 \text{ N}$$

Zu erwartende Dehnung in der Spindelstange:

$$\varepsilon' = \frac{\sigma'}{E'} = \frac{F'}{A' \cdot E'} = 0,22 \%$$

Zu erwartende maximale Spannung in der Spindelstange:

$$\sigma' = \frac{F'}{A'} \cdot \alpha_k = \frac{F'}{\frac{\pi}{4} \cdot d_{\text{Kern}}'^2} \cdot \alpha_k = 0,173 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

d'_{Kern} Kerndurchmesser der Spindelstange; =22,4mm

α_k Kerbzahl; =3,75 nach [6]

Formel 5.2.2.: Maximale Spannung aus Zugbeanspruchung mit Kerbwirkung

Zu erwartende maximale Ordnung im Schnitt ($d=2\text{mm}$) der Spindelstange:

$$\delta' = \frac{\sigma' \cdot d'}{f_{\sigma}} = 1,1 \text{ Ordnungen}$$

Folgender Aufbau wird dazu verwendet die axiale Belastung einzuprägen:

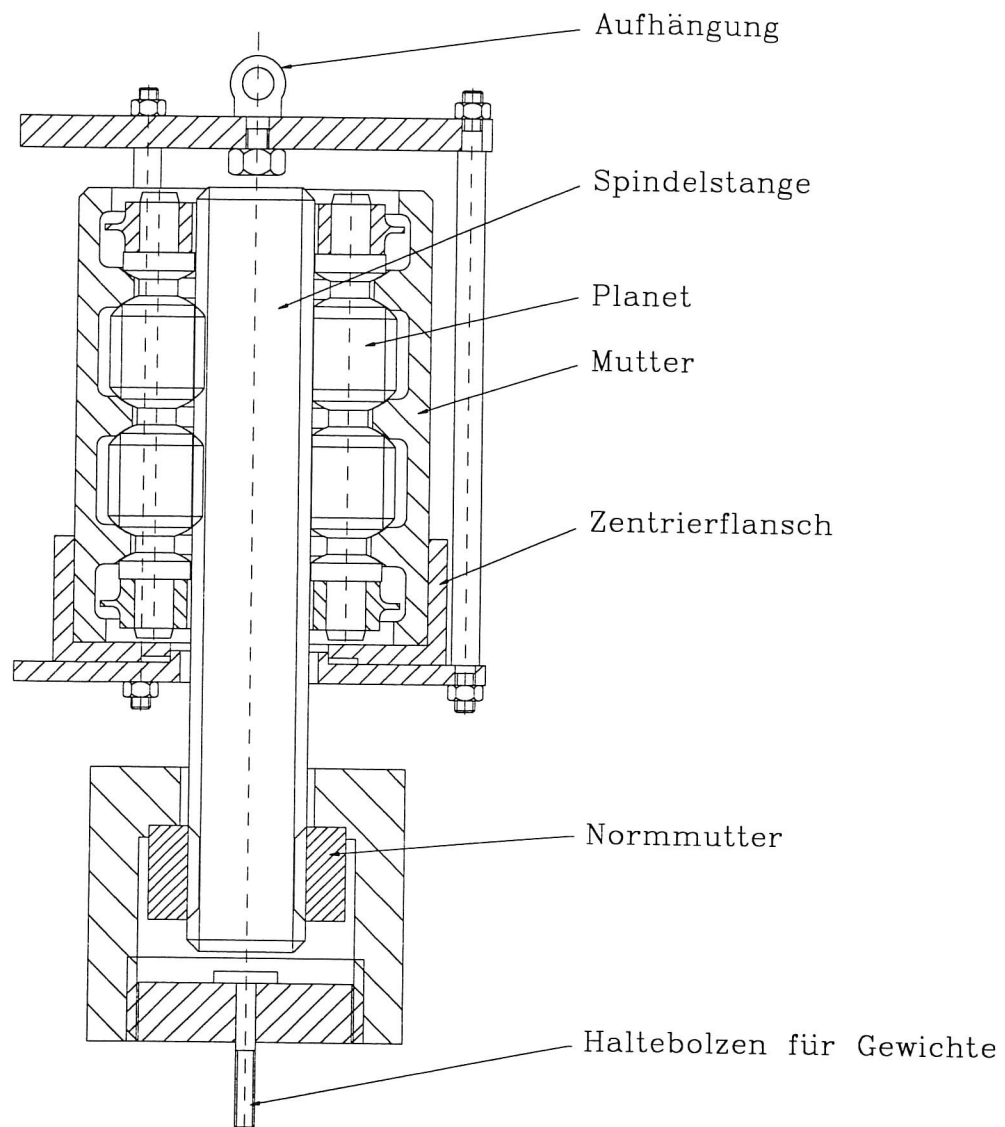


Bild 5.2.3.: Belastungsvorrichtung für PWG-Modell im Einfrierversuch

Die Krafteinleitung in die Spindel erfolgt über die sogenannte Normmutter mit metrischem Gewinde, deren Verformungen und Spannungen als Referenz betrachtet werden können.

Formvermessung vor der Belastung im Einfrierversuch

Alle Einzelteile des Modells wurden nach den fotografischen, Abdruck- und Koordinatenmeß-Verfahren vermessen. Dabei wurden Formfehler aufgrund der Fertigung festgestellt (zur Darstellung und Auswertung siehe Kapitel 6).

Durchführung des PWG-Einfrierversuchs mit Kalibrierversuch

Formfehler der PWG-Modellbauteile wurden kompensiert, indem man die Montage und Belastungsrichtung so gewählt hat, daß fehlerhafte Flanken nicht im Kraftfluß liegen und Durchmesserabweichungen sich ausgleichen. Außerdem wurde die PWG so „eingespielt“, daß Fehlstellungen der Planeten vermieden wurden.

Parallel zum Einfrierversuch der PWG wurde nochmals ein Kalibrierversuch durchgeführt. Die PWG und der Biegebalken erfahren somit die exakt gleiche Wärmebehandlung, die in Kapitel 4.4.2. dargestellt ist. Die Belastung des Biegebalkens mit konstantem Moment ist so ausgelegt, daß in einem 2mm dicken Schnitt $\delta = 1,5$ ($z = 3$) Ordnungen zu sehen sind. Im Polariskop kann man den Schnitt des Biegebalkens neben den Schnitten der PWG-Einzelteile in polychromatischem Licht betrachten und die Farbspektren der Isochromaten direkt den Spannungen zuordnen.

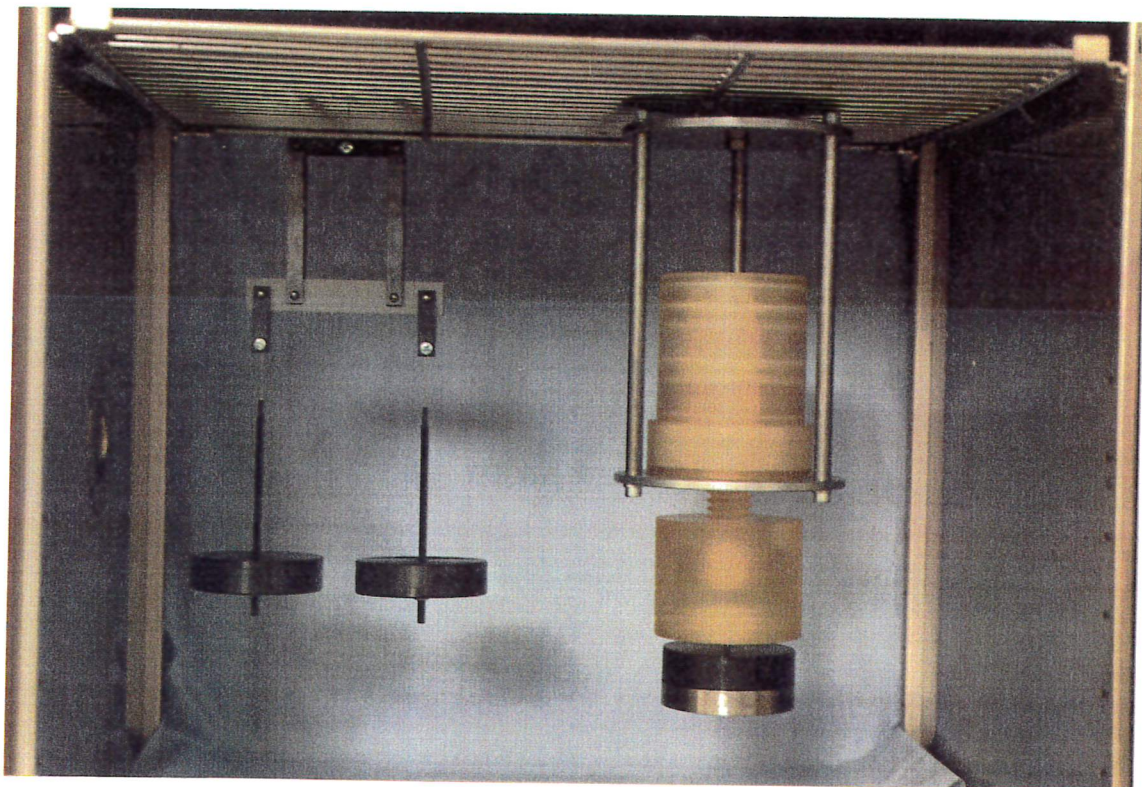


Bild 5.2.4.: Versuchsstand für PWG-Modell im Einfrierversuch

Formvermessung nach der Belastung im Einfrierversuch

Die Formvermessung nach dem Versuch wurde hauptsächlich im Koordinatenmeßverfahren durchgeführt. Der Profilprojektor, der vor dem Versuch noch nicht zur Verfügung stand, ermöglicht durch die elektronische Meßwertaufnahme eine schnelle und genaue Messung (Darstellung und Auswertung siehe Kapitel 6).

Spannungsoptische Auswertung im Polariskop

Der spannungsoptische Effekt ist unter der Bedingung der gleichen Dehnungen von Original und Modell sehr gering ausgefallen (siehe Kapitel 6.2.). Das Herausarbeiten von Schnitten ist nicht sinnvoll. Vor einem zweiten Versuch mit dem selben Modell unter höherer Belastung bzw. größeren Dehnungen kann man die Verformungen aus dem ersten Versuch durch Tempern rückgängig machen.

6. Ergebnisse

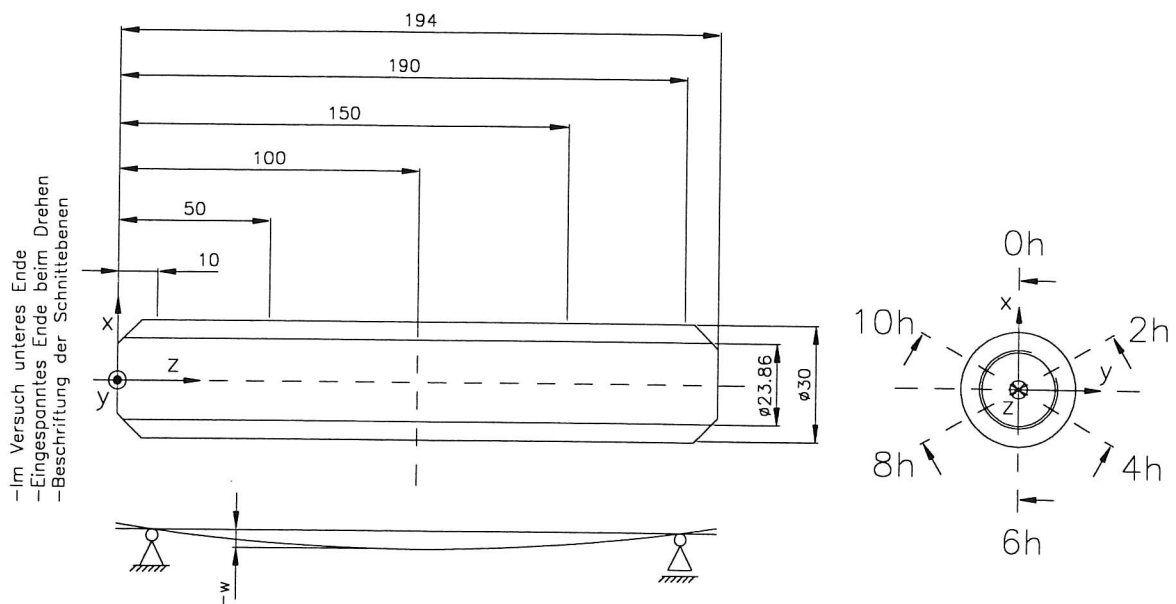
In den folgenden Kapiteln sind die wichtigsten Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Vorschläge zur Verbesserung der Fertigung, der Konstruktion und der Auslegungsvorgaben zusammengestellt. Nicht alle Verfahren zur Form- und Verformungsbestimmung wurden für jedes Bauteil angewendet, sondern die jeweils erfolgversprechendsten wurden ausgewählt. Eine Übersicht über die eingesetzten Verfahren und die ermittelten Kennwerte gibt Bild 6.1.:

	Verfahren	Kennwerte
Spindel	<ul style="list-style-type: none"> - Fotografisches Verfahren - Koordinatenmeßverfahren * vor Versuch: Fräsmaschine mit Meßoptik * nach Versuch: Profilprojektor 	<ul style="list-style-type: none"> - Max. Dehnung: 0,23 %
Normmutter	<ul style="list-style-type: none"> - Abdruckverfahren - Koordinatenmeßverfahren * Meßschieber * Mikrometerschraube 	<ul style="list-style-type: none"> - Anzahl der tragenden Gewindegänge: ≈1,5
Planeten	<ul style="list-style-type: none"> - Fotografisches Verfahren - Koordinatenmeßverfahren * vor Versuch: Fräsmaschine mit Meßoptik * nach Versuch: Profilprojektor 	<ul style="list-style-type: none"> - Traganteil der möglichen Kontaktpunkte (spindelstangenseitig): 34/40 = 85 % - Kraftüberhöhung: 2,7-fach
Mutter	<ul style="list-style-type: none"> - Abdruckverfahren - Koordinatenmeßverfahren * Meßschieber * Mikrometerschraube 	<ul style="list-style-type: none"> - Traganteil der möglichen Kontaktpunkte (Mutter-Planet): 9/15 = 60 % - Kraftüberhöhung: 3,5-fach

Bild 6.1.: Übersicht über angewendete Verfahren zur Formvermessung und ermittelte Kennwerte

6.1. Spindelstange, Normmutter

Während jeder Bauteilformvermessung wurde ein Meßprotokoll erstellt, das die Festlegung des Bezugssystems und die Lage der Meßpunkte erkennen läßt. Die aus den Koordinaten errechneten Abmaße sind tabellarisch aufgetragen, dabei sind die Meßwerte vor (v) und nach (n) der Belastung im Einfrierversuch gegenübergestellt. Die Koordinatenmessungen vor dem Einfrierversuch wurden mit der Fräse und Meßoptik durchgeführt, danach mit dem Profilprojektor, der eine umfangreichere und genauere Meßwertaufnahme erlaubt. Aus der tabellarischen Darstellung der Meßwerte kann man nur schwer die Verformungen und deren Ursachen direkt erkennen, deshalb sei das Protokoll in Bild 6.1.1. nur zur Vollständigkeit angegeben, die detaillierte Interpretation folgt in den anschließenden Kapiteln.



		0h		2h (\equiv PI4)		4h (\equiv PI3)		6h (\equiv PI2)		8h		10h	
		v	n	v	n	v	n	v	n	v	n	v	n
Durchbiegung: w in [mm]	10	0	0	0	0	0	0	$= (-1) \times 0h$		$= (-1) \times 2h$		$= (-1) \times 4h$	
	50	0,06	0,05	0,03	0,20	-0,03	0,17						
	100	0,07	0,05	0,05	0,25	-0,02	0,26						
	150	0,03	0,01	0,03	0,12	-0,01	0,15						
	190	0	0	0	0	0	0						

6. Ergebnisse

		0h		2h (\cong PI4)		4h (\cong PI3)		6h (\cong PI2)		8h		10h	
		v	n	v	n	v	n	v	n	v	n	v	n
Gewinde- steigung: [mm/Umdr.]	0-50-	5,00	5,007	5,00	5,006	5,00	5,010	5,00	5,000	5,00	5,006	5,00	5,007
	-100-	5,00	5,001	4,99	4,997	5,00	4,999	4,99	4,976	4,99	4,997	4,99	5,001
	-150-	5,00	5,012	4,99	5,009	4,99	5,018	4,99	5,014	4,99	5,009	5,00	5,009
	-190	5,00	5,010	5,00	5,010	4,99	5,013	4,99	5,013	4,99	5,010	5,00	5,011
	Mittel	5,00	5,006	5,00	5,009	5,00	5,009	5,00	5,008	4,99	5,006	5,00	5,006
Gewinde- außen- \varnothing : [mm]	10	28,13	28,13	28,12	28,06	28,10	28,09	= 0h		= 2h		= 4h	
	50	28,34	28,32	28,32	28,27	28,31	28,27						
	100	28,52	28,50	28,51	28,47	28,50	28,48						
	150	28,37	28,35	28,33	28,31	28,37	28,36						
	190	28,13	28,09	28,13	28,11	28,12	28,23						
Gewinde- kern- \varnothing : [mm]	10	22,22	22,24	22,22	22,22	22,20	22,22	= 0h		= 2h		= 4h	
	50	22,40	22,42	22,40	22,40	22,39	22,40						
	100	22,58	22,64	22,58	22,63	22,61	22,62						
	150	22,43	22,47	22,40	22,42	22,46	22,49						
	190	22,20	22,24	22,19	22,21	22,19	22,24						

Gesamtlänge: vorher: 194,24mm nachher: 194,45mm

Gewicht: vorher: 119,7g nachher: 119,7g

Fehler im Einstellwinkel: $\approx 1,1^\circ$

Bild 6.1.1.: Meßprotokoll Spindelstange

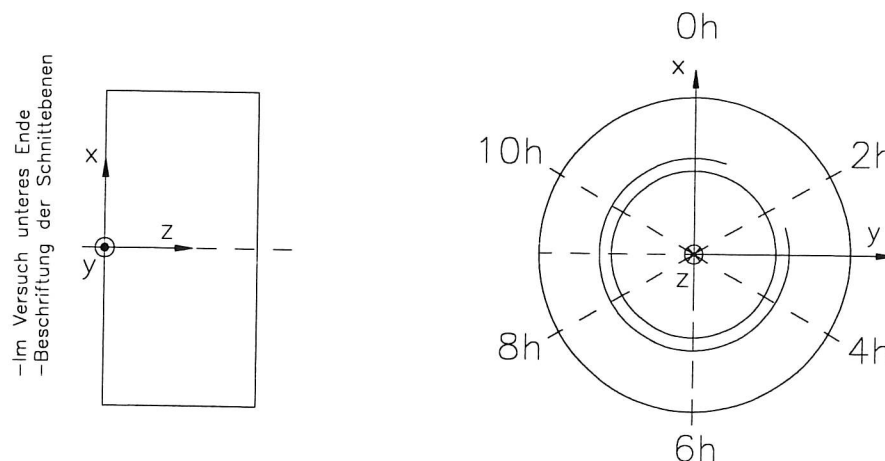


Bild 6.1.2.: Vereinbarung der Koordinaten- und Schnitttrichtungen für die Normmutter

6.1.1. Vor der Belastung im Einfrierversuch

→ (Bild 6.1.1.1.) Flankenfehler am Spindelstangengewinde durch ungünstige Schneidengeometrie.

⇒ Der Gewindedrehstahl sollte den Außendurchmesser nicht beeinflussen. Das ausschlaggebende Maß für die Gewindefertigung ist der Flankendurchmesser. Der Außendurchmesser sollte vor dem Gewindedrehen schon auf das Fertigmaß gedreht sein.

→ (Bild 6.1.1.1.) Falscher Einstellwinkel des Gewindedrehmeißels: $1,1^\circ$

⇒ Die Winkelhalbierende des dreieckigen Drehstahls muß im rechten Winkel zur Werkstückdrehachse stehen. Die Zustellung sollte bei metrischem Gewinde parallel zu einer Flanke im 30° Winkel erfolgen, eventuell kann im letzten Schnitt bei senkrechter Zustellung ein Glätten der stückweise erzeugten Flanke von Vorteil sein.

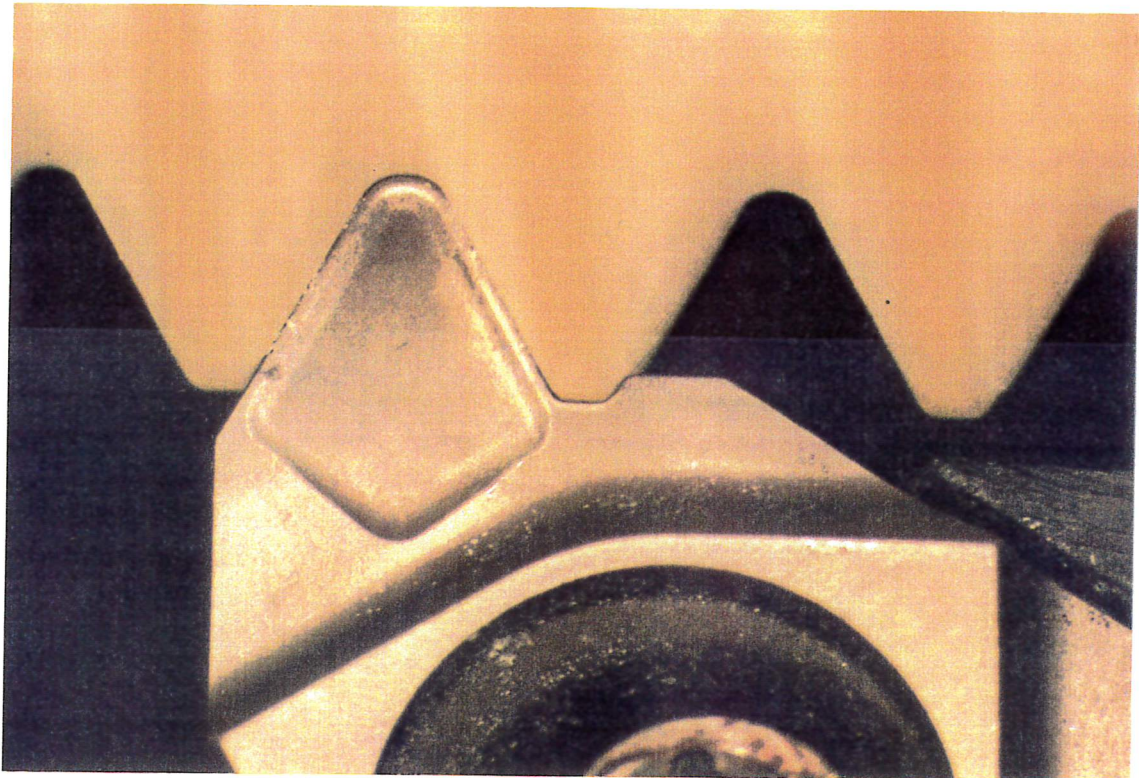


Bild 6.1.1.1.: Fehlerhaftes Gewinde (M30x5) der Spindelstange

→ (Bild 6.1.1.2.) Die Spindelstange hat sich während der Bearbeitung aufgrund der Schnittkräfte elastisch durchgebogen, so daß der Durchmesser in der Mitte der Spindel um 0,4mm (1,4%) größer ist als an den Enden. In den Darstellungen kann man außerdem erkennen, daß das Werkstück links (Wert der horizontalen Achse =0) eingespannt war und rechts mit der Reitstockspitze gehalten wurde (siehe 6.1.2.1.). In den 3 vermessenen Schnitten ist die Ausbildung des „Bauches“ gleich groß. Die Spindelstange ist somit rotationssymmetrisch. Die Rotationssymmetrie ist eine notwendige Bedingung für die Berechnung der Durchbiegung der Mittelachse aus den in den Schnittebenen gemessenen Koordinaten der Gewindespitzen.

⇒ Die Schnittkräfte sollten durch geringe Zustellung klein gehalten werden. Die Verformung der Spindelstange kann durch eine Lunette verringert werden. Die Spindelstange der PWG im Original aus Polyamid wird gerollt, so daß keine Durchbiegung während der Bearbeitung auftreten kann, allerdings können größere Rundlauffehler auftreten.

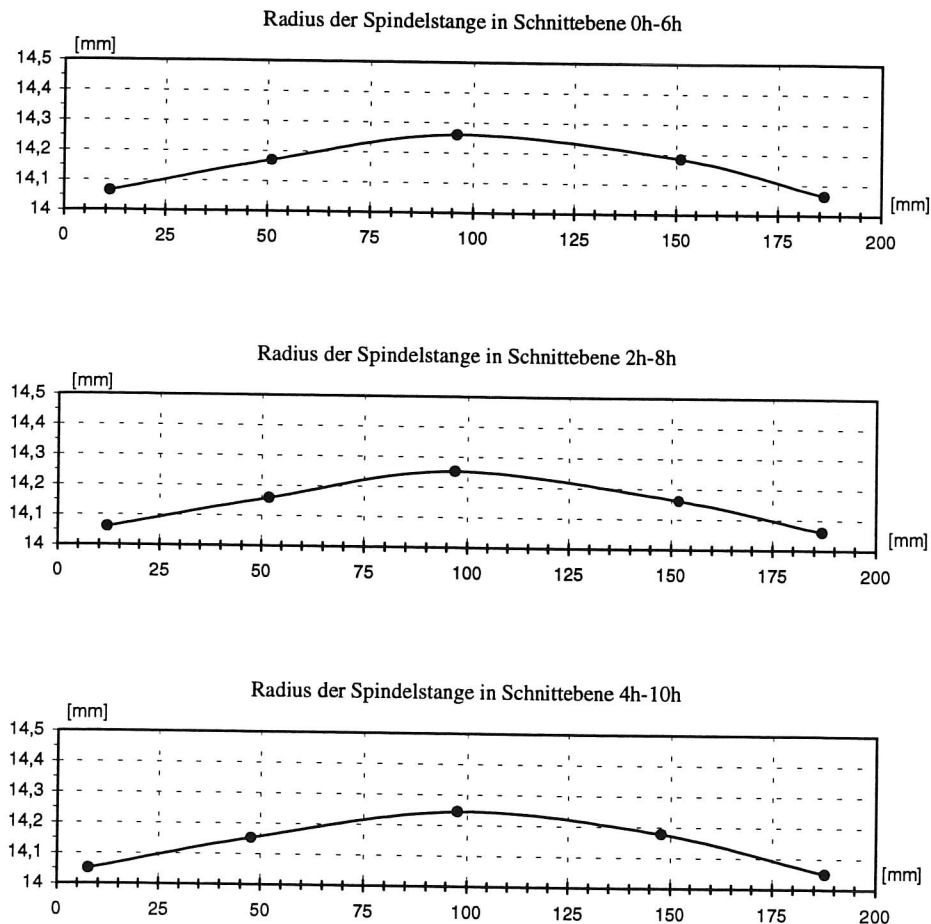


Bild 6.1.1.2.: Radius der Spindelstange in drei Schnittebenen vor der Belastung

→ (Bild 6.1.1.3.) Da die Koordinaten der Kontaktpunkte zwischen Spindelstange und Planet weder zeichnerisch noch rechnerisch exakt bestimmt werden können, ist der vorgegebene Durchmesser für die Spindelstange nicht der Durchmesser, bei dem die PWG spielfrei bzw. ohne Vorspannung läuft. Aus diesem Grund wurde der Durchmesser der Spindelstange nach Fertigung der Mutter und Planeten angepaßt. Legt man die Meßpunkte über die approximierte Sollkontur (Fehler im Hundertstelbereich möglich), so erkennt man, daß die Spindelstange insgesamt mit zu kleinem Durchmesser gefertigt wurde.

⇒ Die PWG hat sehr viel Spiel, wodurch die Planeten sich in ihren Freiheitsgraden (siehe Kapitel 4.2. und 6.2.1.) bewegen können und Fehlstellungen einnehmen. Die Ausbildung und Lage der Kontaktpunkte geschieht nicht in vorgesehener Art und Weise. Sogar die Funktion der PWG kann durch Verklemmen der Spindelstange und Planeten infolge von Verschränken der Planeten gestört werden (Freilauffeffekt).

⇒ Im Original wird der Innendurchmesser der Mutter angepaßt. Dieses Vorgehen birgt die selben Fehlerquellen und sollte durch exakte Maß- und Toleranzangaben für die Fertigung ersetzt werden.

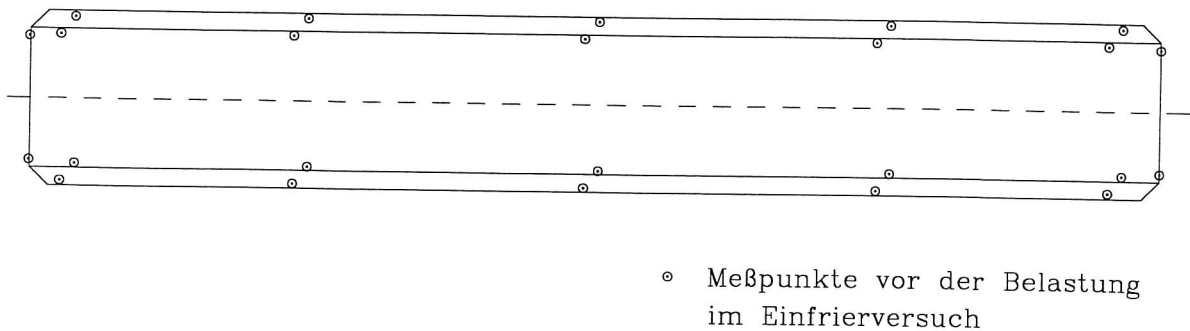


Bild 6.1.1.3.: Meßpunkte der Spindelstange auf die Sollkontur projiziert

In den folgenden Bildern (6.1.1.4. bis 6.1.1.6.) sind rechts und links (mittig die Durchbiegung der Spindelstange) die Mittelwerte der Steigung für 4 Längenabschnitte aufgetragen. Vor der Belastung im Einfrierversuch wurden drei Schnittebenen 6h-0h, 2h-8h und 4h-10h vermessen, die im Versuch etwa den Schnitten mit Planet 2, 4 und 3 entsprechen.

→ Die aus den Koordinatenmeßwerten errechnete Steigung des Gewindes der Spindelstange liegt nach Mittelwertbildung in Übereinstimmung mit dem Sollwert bei 5,00mm/Umdr.. Die in den Diagrammen aufgetragenen Mittelwerte der Teilstücke schwanken im Bereich von 4,992mm/Umdr. (Abweichung: 0,16%) bis 5,012mm/Umdr. (Abweichung 0,24%). Diese Schwankungen ergeben sich aus Rundungsfehlern und Meßungenauigkeiten der Fräsmaschine mit Meßoptik.

→ Die ebenfalls aus den Koordinatenmeßwerten errechnete Durchbiegung der Spindelstangenmittelachse hat den maximalen Wert von 0,07mm in der Schnittebene 6h-0h. Die Durchbiegung vor der Belastung im Einfrierversuch ist im Vergleich zur Radiusänderung klein (siehe Bild 6.1.1.2.) und hat zunächst nur geringen Einfluß auf die Ausbildung der Kontaktgeometrien.

6. Ergebnisse

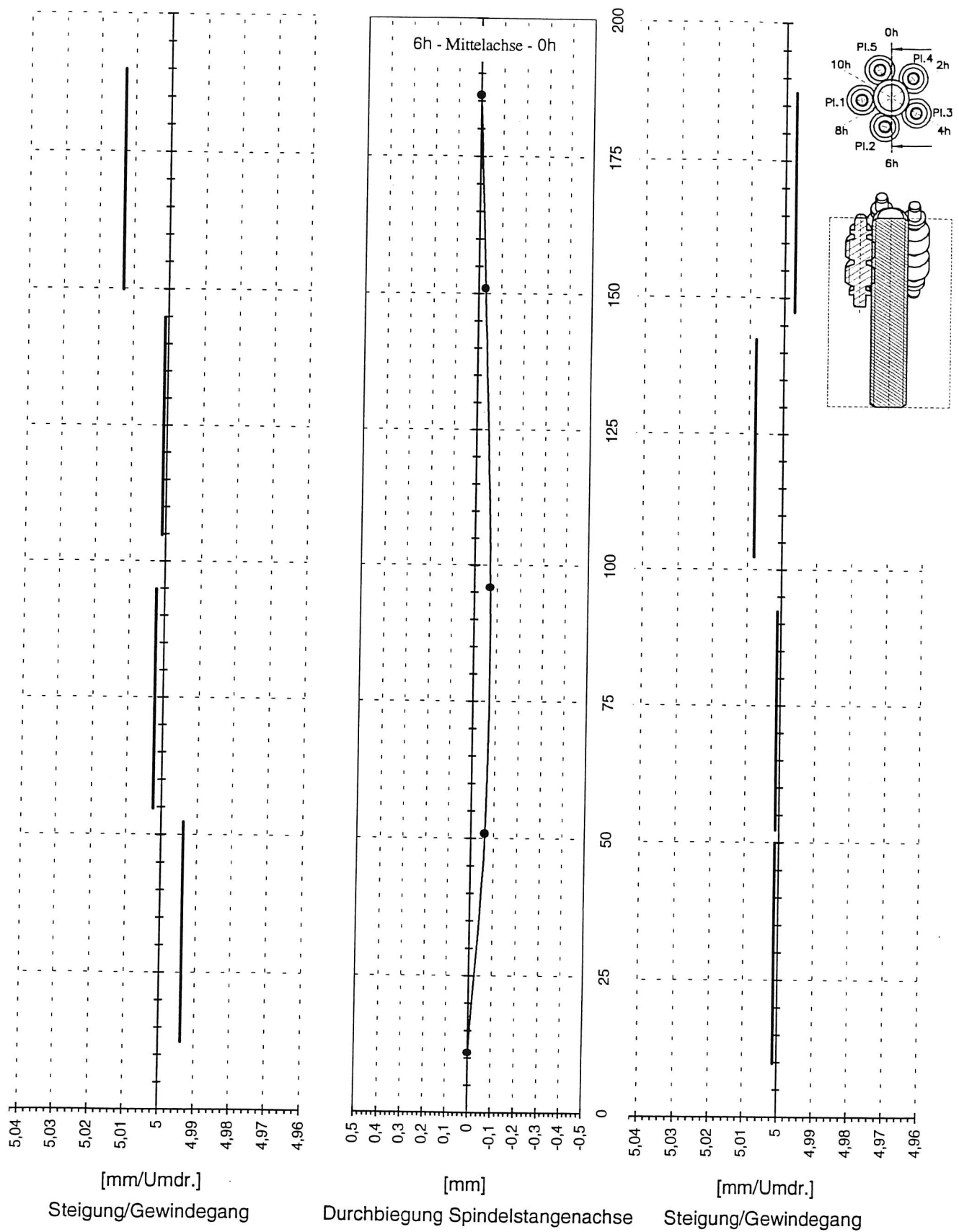


Bild 6.1.1.4.: Formvermessung der Spindelstange vor der Belastung in Schnittebene 6h-0h (\cong Planet 2 links)

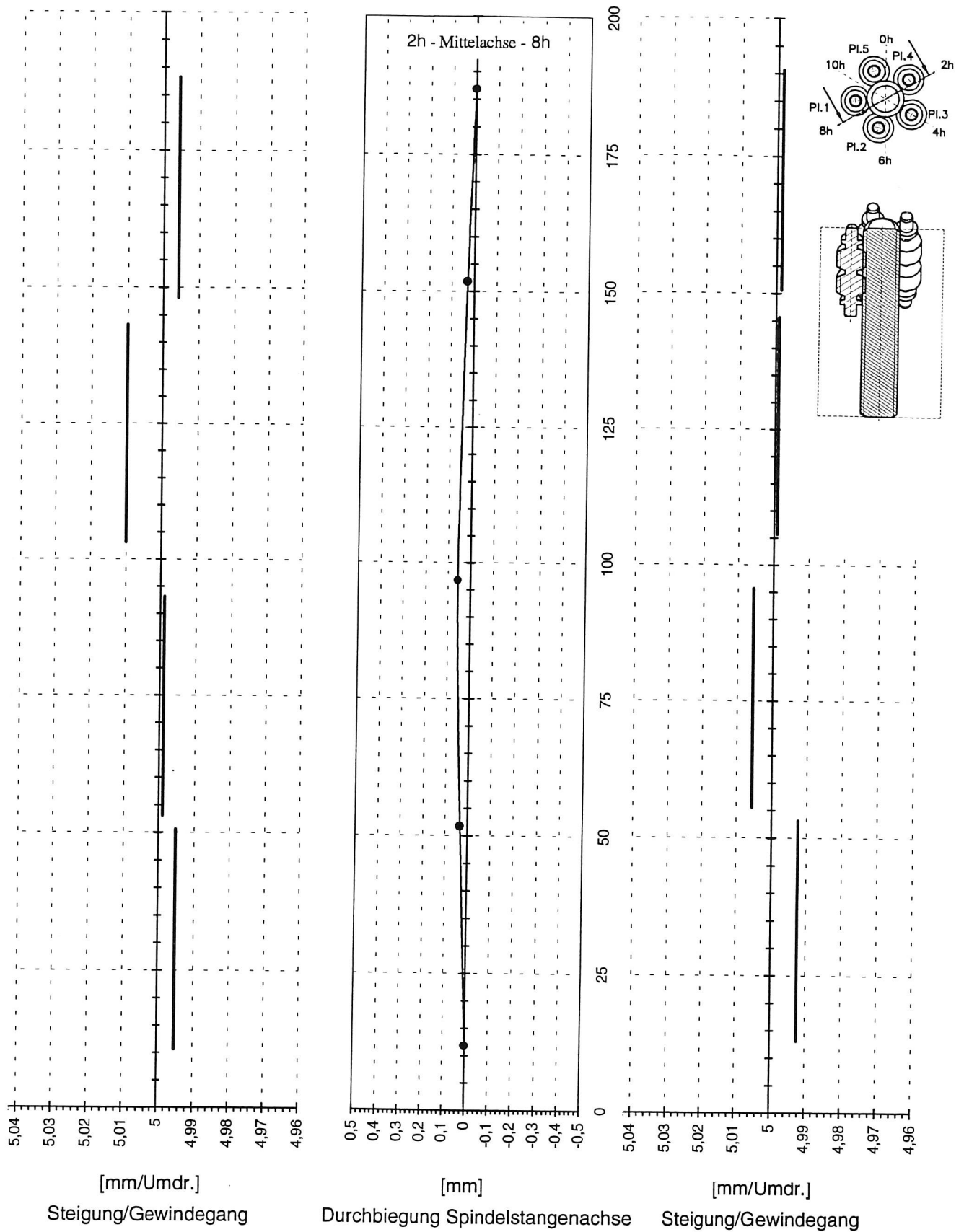


Bild 6.1.1.5.: Formvermessung der Spindelstange vor der Belastung in Schnittebene 2h-8h (\cong Planet 4 links)

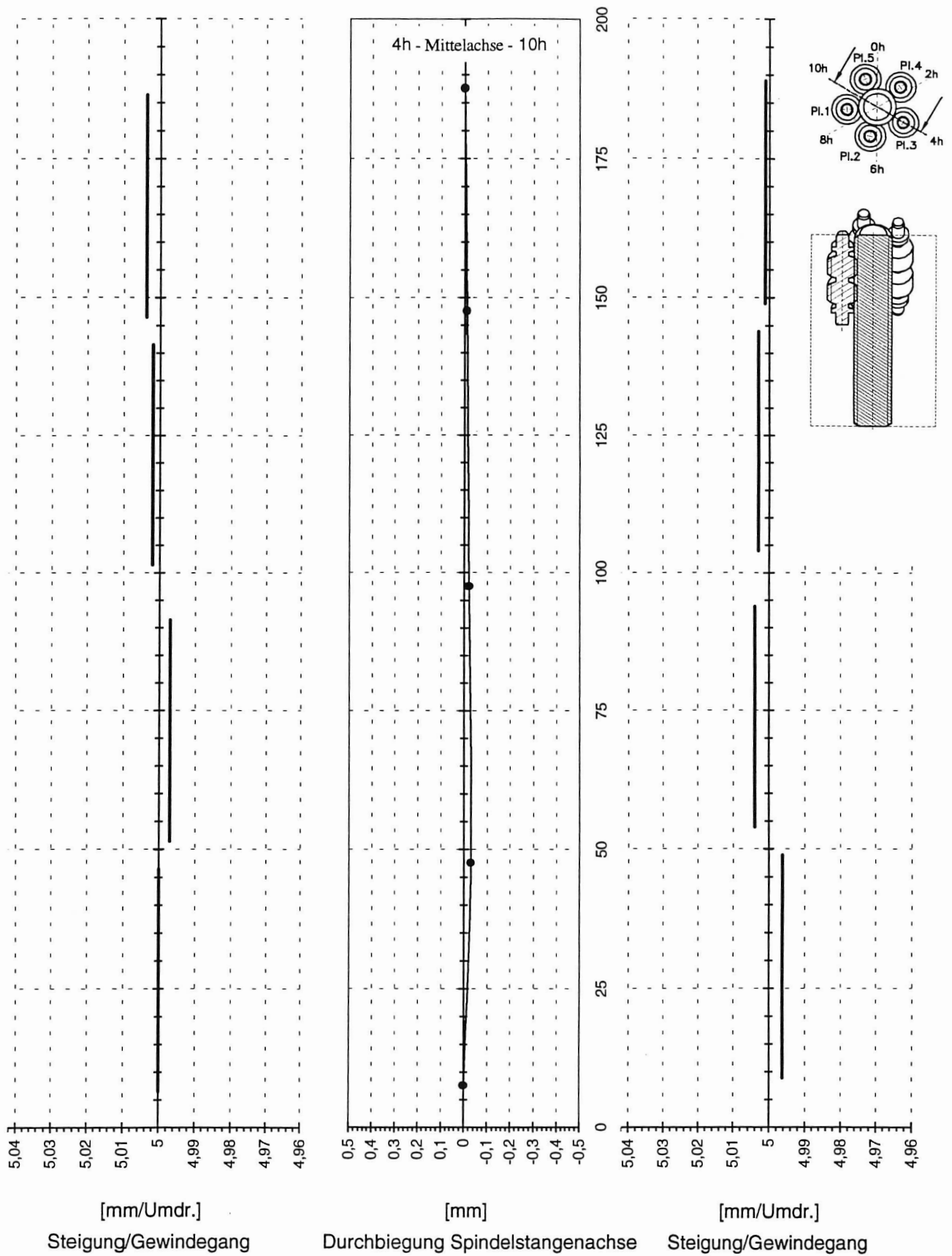


Bild 6.1.1.6.: Formvermessung der Spindelstange vor der Belastung in Schnittebene 4h-10h (Planet 3 links)

→ Das Gewinde M30x5 mit Nenndurchmesser 30mm und einer Steigung 5mm entspricht nicht den Abmessungen eines Gewindes mit Nenndurchmesser 30mm nach Norm. Nach Norm hat M30 die Steigung 3,5mm. Eine Steigung von 5mm besitzt erst das Gewinde mit Nenndurchmesser 48mm.

Für die Fertigung des Innengewindes der Normmutter ergibt sich das Problem, daß der Drehmeißel für die Flankenform mit Steigung 5mm nicht in die Bohrung der Normmutter paßt. Nur mit einem Spezialdrehmeißel konnte das Innengewinde hergestellt werden. Das Gewinde des Originals M6x1 hingegen entspricht den Abmessungen aus der Normtabelle.

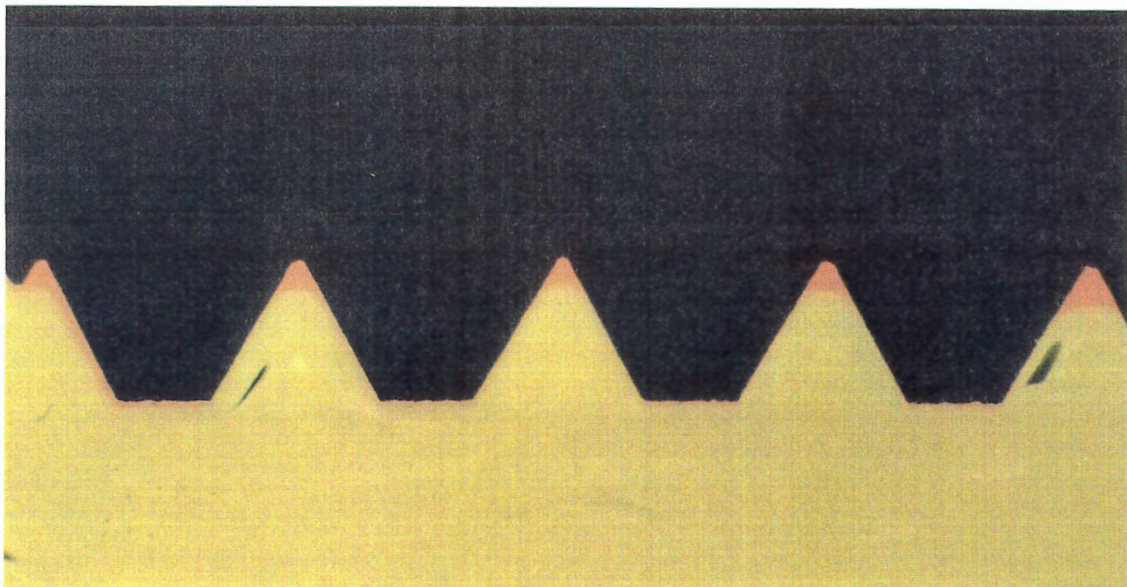
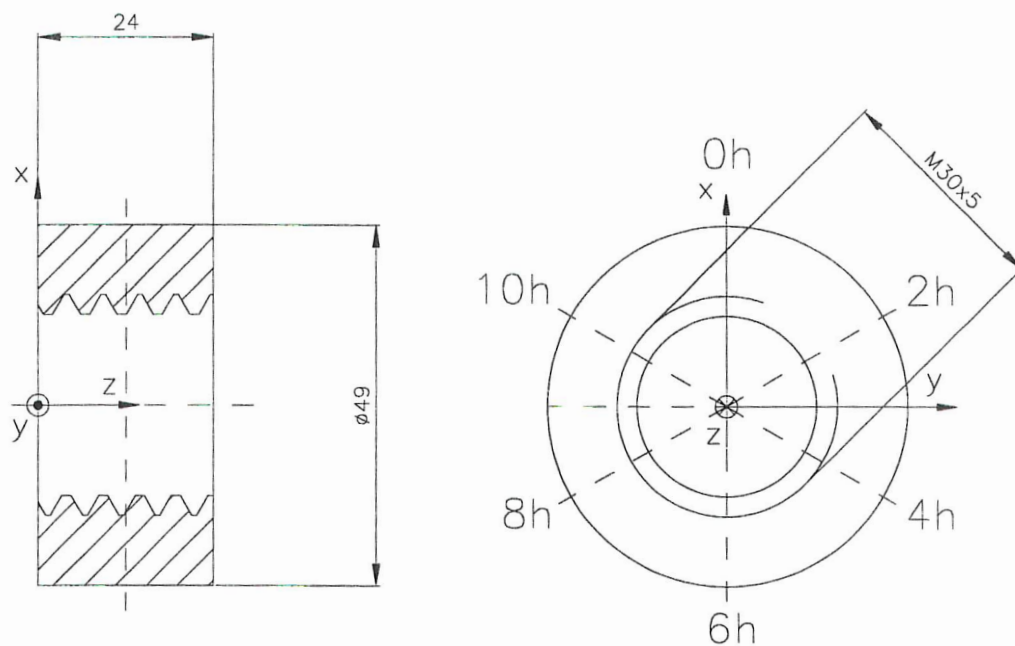


Bild 6.1.1.7.: Sollkontur und Negativabdruck des Innengewindes M30x5 der Normmutter

6.1.2. Nach der Belastung im Einfrierversuch

Die Koordinatenmessungen an der Spindelstange nach der Belastung im Einfrierversuch wurden mit dem Profilprojektor nach folgendem Meßplan durchgeführt:

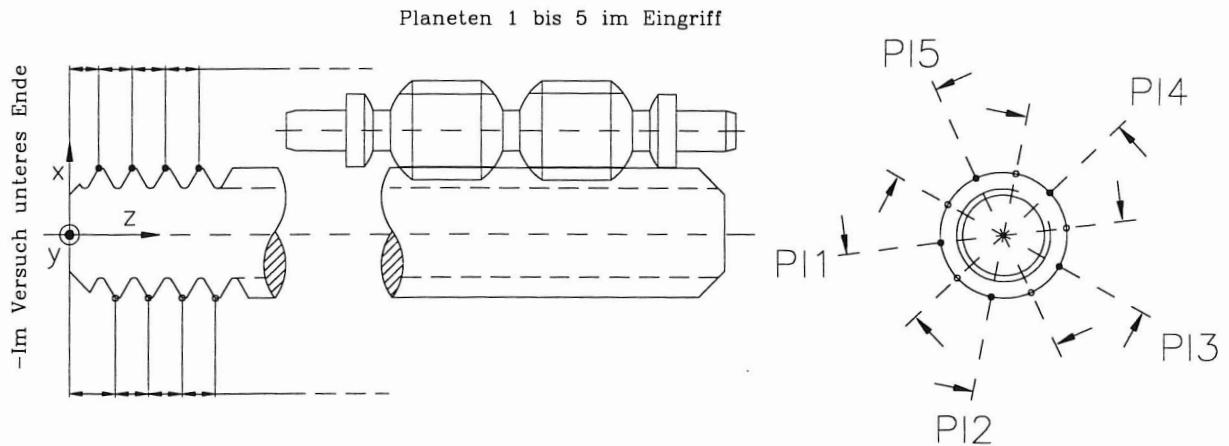
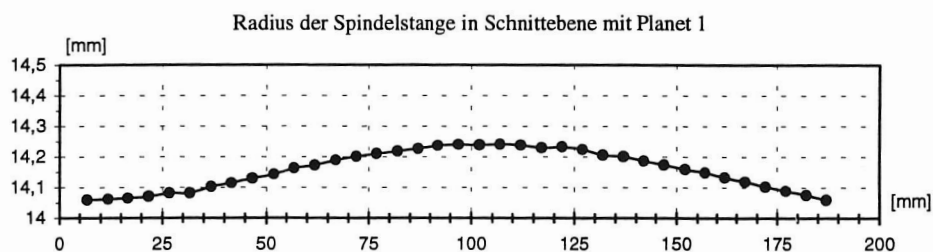


Bild 6.1.2.1.: Meßplan für Koordinatenmessung an der Spindelstange

→ Die axiale Belastung hat eine Verlängerung der Spindelstange herbeigeführt. Der Durchmesser hat gleichzeitig im Mittel um 0,046mm (0,16%) abgenommen (Bild 6.1.2.2.). Nach wie vor ist der Bauch in den fünf vermessenen Schnittebenen gleich, und somit ist die Bedingung der Rotationssymmetrie weiterhin erfüllt.

Der Ursprung der in den Diagrammen horizontalen Achse bezeichnet das im Versuch untere Ende der Spindelstange.



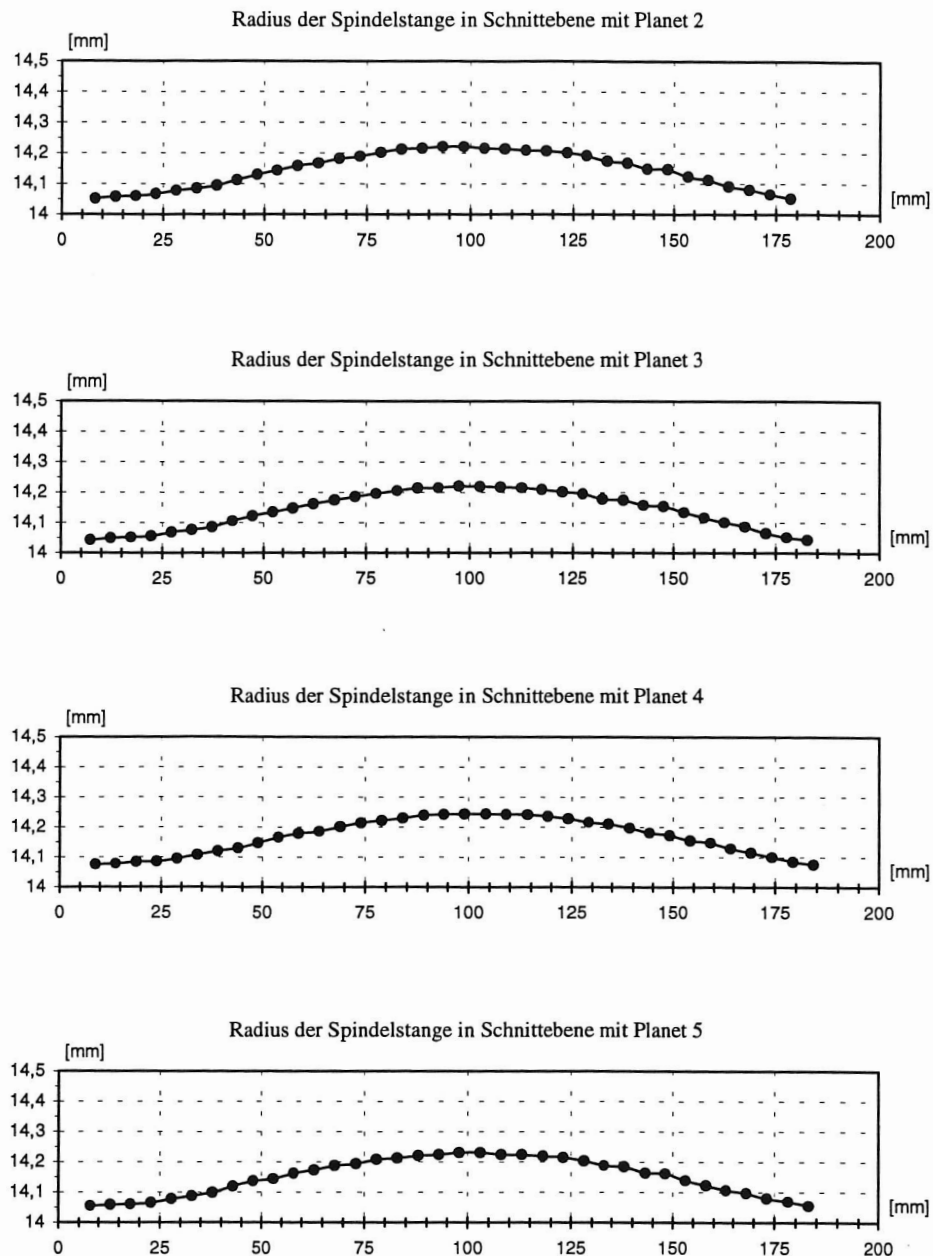


Bild 6.1.2.2.: Radius der Spindelstange nach der Belastung im Einfrierversuch in den fünf Schnittebenen der Planeteneingriffe

→ (Bild 6.1.2.3.) Das im Versuch untere Ende der Spindelstange wird als Bezugspunkt für die Verlängerung bzw. die Verschiebung der Gewindespitzen in Längsrichtung (z-Richtung) gewählt. In den fünf vermessenen Schnittebenen der Spindelstange ist nur an einer Seite ein Planet im Eingriff. Die durch die ausgefüllten Punkte erzeugte Kurve stellt die Mittelwerte der Verschiebung der Gewindespitzen dar. Die nicht ausgefüllten Punkte ergeben die gemittelte Verschiebungskurve der den Planeten gegenüberliegenden Seiten, die der Verschiebungskurve der Spindelstangenmittelfaser in allen Bereichen I bis IV entspricht.

Die Steigung der Verschiebungskurve gibt die Dehnung an. In Bild 6.1.2.3. ist die Dehnung aus jeweils zwei aufeinanderfolgenden Verschiebungswerten berechnet worden.

→ Im Bereich I wurde die axiale Last über das Gewinde der Normmutter auf die Spindelstange übertragen. Der Knick der Verschiebungskurve beim Übergang von Bereich I zu II deutet darauf hin, daß die Kräfteverteilung über die Gewindegänge extrem ungleichmäßig war, d.h. 1,5 Gewindegänge (bei 23mm auf der horizontalen Achse) übertrugen fast 100% der axialen Last, die restlichen 2 Gewindegänge waren unbelastet. Da die Gewindegänge von Normmutter und Spindelstange sich flächig berühren, ist die Last über den Umfang verteilt und man erhält geringe Flächenpressung (siehe spannungsoptische Auswertung Bild 6.1.2.12.).

→ Im Bereich II der Spindelstange zwischen Normmutter und PWG wirkte die eingeprägte axiale Last von 18,2N und der Einfluß des Eigengewichtes (4,3% der Axiallast von 18,2N) nahm zu, so daß die Dehnung leicht ansteigt. Im Mittelwert liegt die Dehnung bei 0,23%, nach Auslegung sollte sich ein Wert von 0,22% ergeben.

⇒ Der Einfluß des Eigengewichtes ist bei dem Modellmaßstab 5:1 erkennbar, aber noch nicht von Bedeutung. Würde man den Maßstab noch größer wählen, um den spannungsoptischen Effekt höher auflösen zu können, müßte man beim Übertragen der Ergebnisse vom Modell auf das Original darauf Rücksicht nehmen.

→ Im Gegensatz zu Bereich I, in dem die Last auf einem kurzen Längenabschnitt, aber gut über den Umfang verteilt, übertragen wurde, erhält man die umgekehrte Verteilung im Bereich III der Spindelstange in der PWG. Die Kräfteverteilung in Längsrichtung war zwar nicht konstant (siehe Kapitel 6.2.2.), erstreckte sich aber auf einen vergleichsweise langen Abschnitt (von 110mm bis 165mm). Diesen Vorteil gegenüber der Normmutter erkaufte man sich durch eine extrem ungleichmäßige Lastverteilung über dem Umfang. Der Abstand der Kurve mit ausgefüllten Punkten (Planeten im Eingriff) von der Kurve mit nicht ausgefüllten Punkten (gegenüber Planeteneingriffen zwischen zwei Planeten) stellt die Verformung des Gewindes im Bereich der Kontaktpunkte dar. D.h. die Gewindegänge gaben in unmittelbarer Nähe eines Kontaktpunktes im Mittel um 0,03mm mehr nach als die Mittelfaser der Spindelstange.

⇒ Der Mittelwert hat hier nur eine geringe Aussagefähigkeit, da starke Lastüberhöhungen auftreten, die das Kriterium für die Auslegung darstellen (siehe Kapitel 6.2.2.). Hier wird deutlich, daß es sich bei der Auslegung der PWG um ein Kontaktproblem handelt. Es gilt die Kontaktpunkte, die tatsächlich als kleine Kontaktflächen ausgebildet sind, zu optimieren.

→ Der lastfreie Bereich IV der Spindelstange, der oben aus der PWG herausragt, ist hier nur durch einen Meßwert repräsentiert. Die Verlängerung sollte konstant verlaufen und die Dehnung bei 0 liegen. Abweichungen spiegeln die Meßungenauigkeiten wieder.

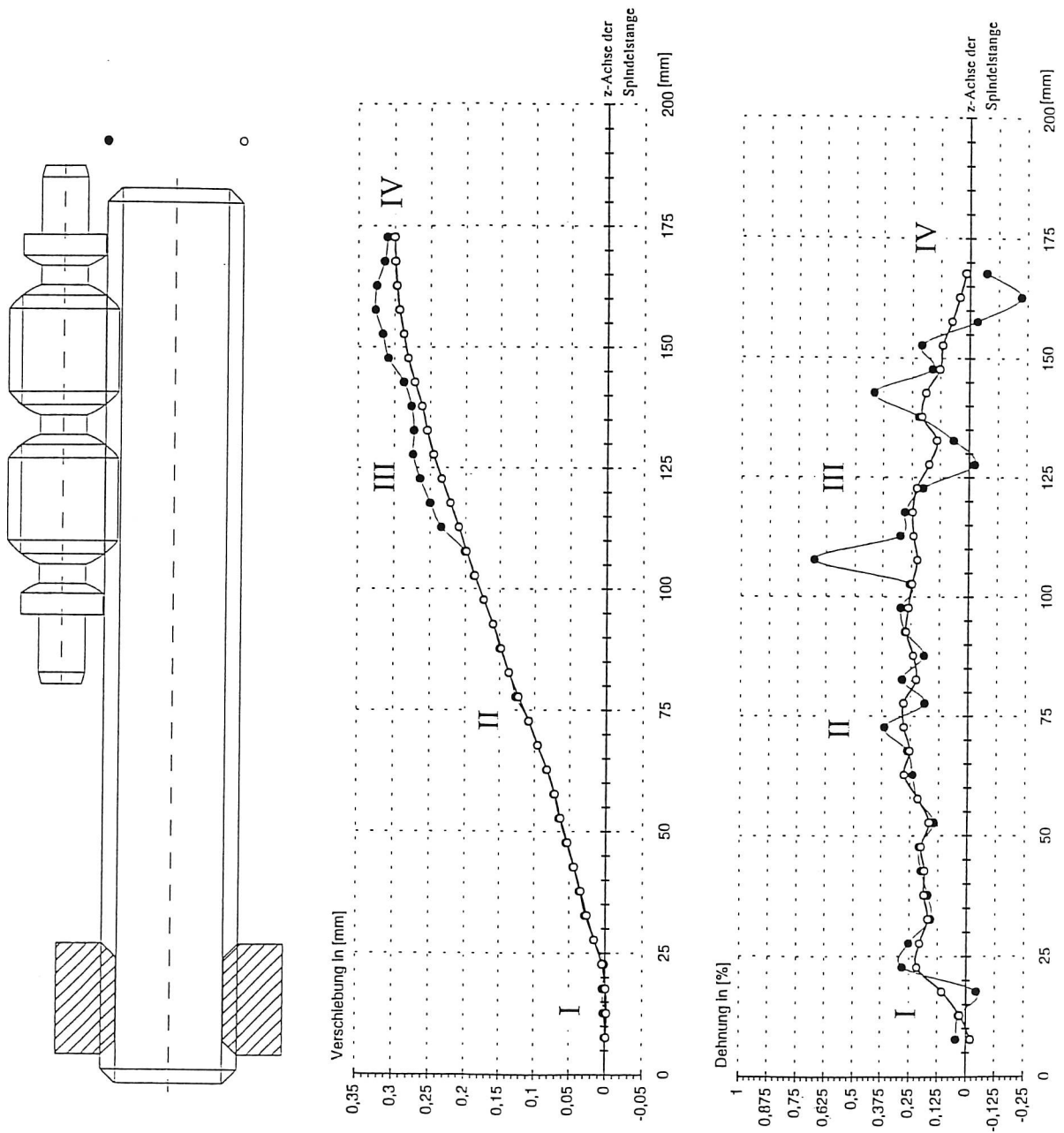


Bild 6.1.2.3.: Mittelwerte der Verschiebung und der Dehnung der Spindelstange, errechnet aus den Koordinatenmeßwerten der Gewindespitzen in den Schnitt Ebenen mit Planeten 1 bis 5

→ (Bild 6.1.2.5. bis 6.1.2.9.) Da die Mittelwerte keine Aussage über die extrem ungleichmäßig über Länge und Umfang verteilten Kontaktkräfte zulassen, sind die Meßwerte aus den fünf Schnittebenen zusammen mit der Durchbiegung aufgeführt. Der Abstand von einem Gewindegang zum nächsten über der Länge aufgetragen ergibt eine Darstellung, die einer Dehnungsdarstellung entspricht.

→ Die Spindelstange wurde in der Ebene 3h-9h durchgebogen. Der Grund hierfür sind die über den Umfang ungleichmäßig verteilten Einzelkontaktkräfte zwischen Planeten und Spindelmutter. Die maximale Durchbiegung beträgt 0,29mm.

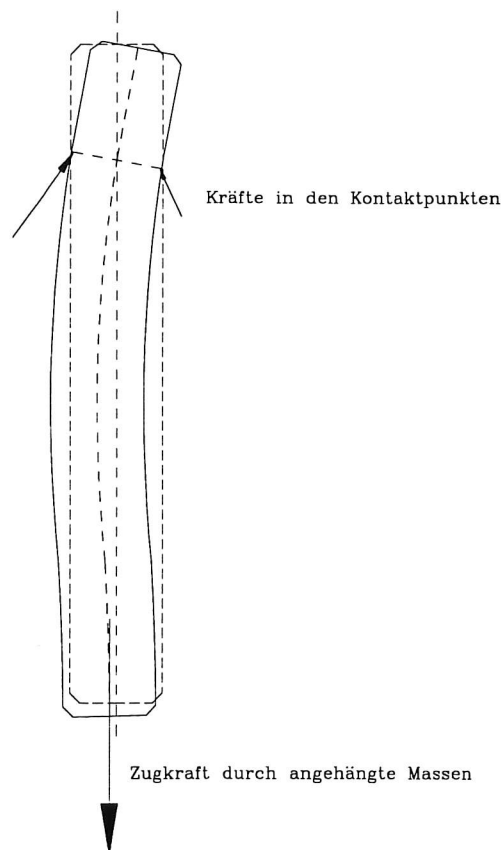


Bild 6.1.2.4.: Durchbiegung der Spindelstange aufgrund ungleicher Kontaktkräfte

→ Die Durchbiegung der Spindelstange bewirkt vergrößerte Flankenabstände bzw. Teilung auf der gedehnten und verminderte Abstände auf der gestauchten Seite.

→ Die Planeten 1 und 4 haben kaum Axiallast von der Spindelstange auf die Mutter übertragen. Nur drei Planeten, wie aus der statischen Betrachtung vorausgesagt (siehe Kapitel 4.2.4.), sind voll im Einsatz. Die Größe der Einzelkontaktkräfte ist aus den Dehnungsdiagrammen nur mit sehr großem Fehler auszurechnen, eine genaueres Ergebnis erlaubt die Auswertung des spannungsoptischen Effekts (siehe Kapitel 6.2.2.).

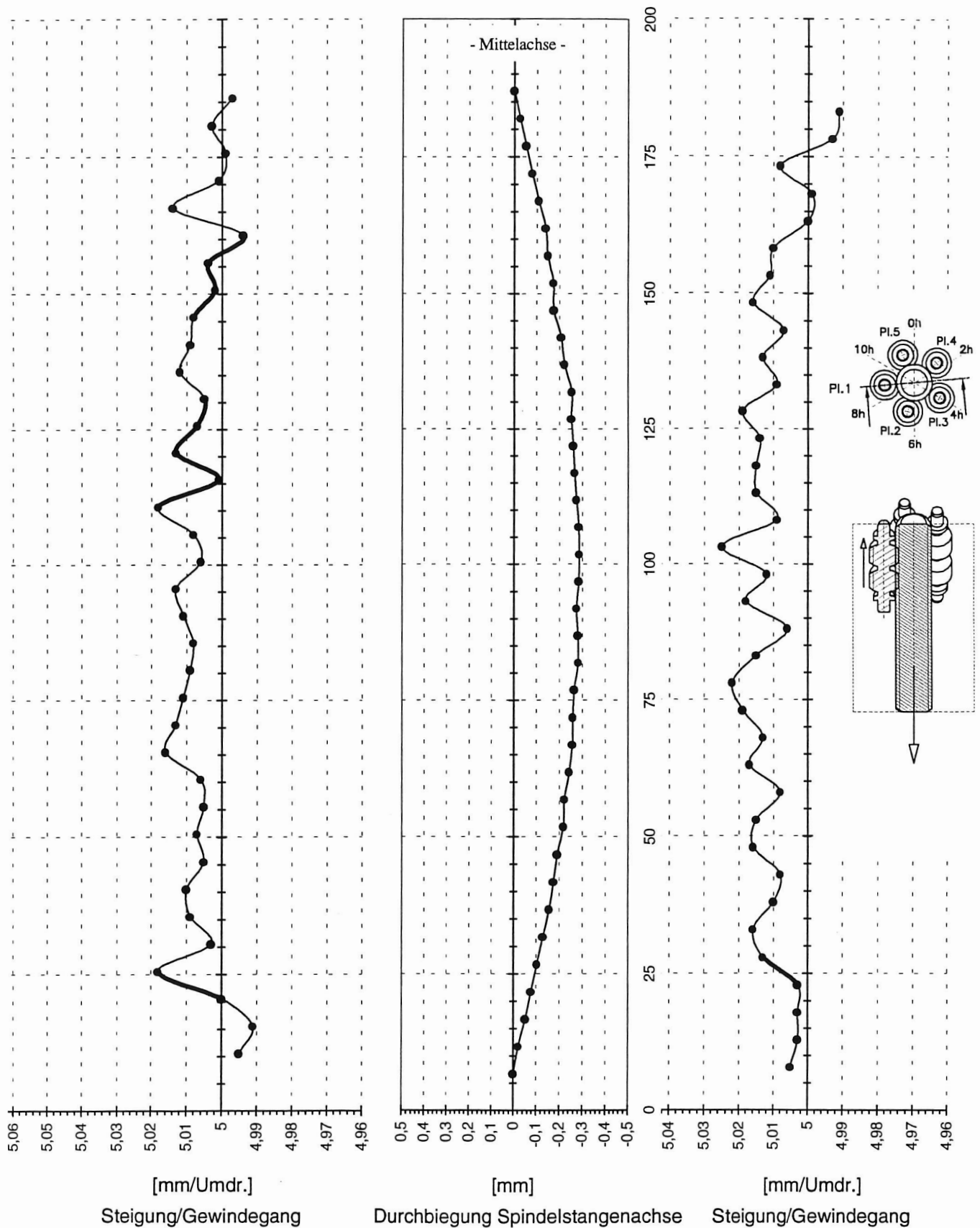


Bild 6.1.2.5.: Formvermessung der Spindelstange nach der Belastung in Schnittebene Planet 1 links

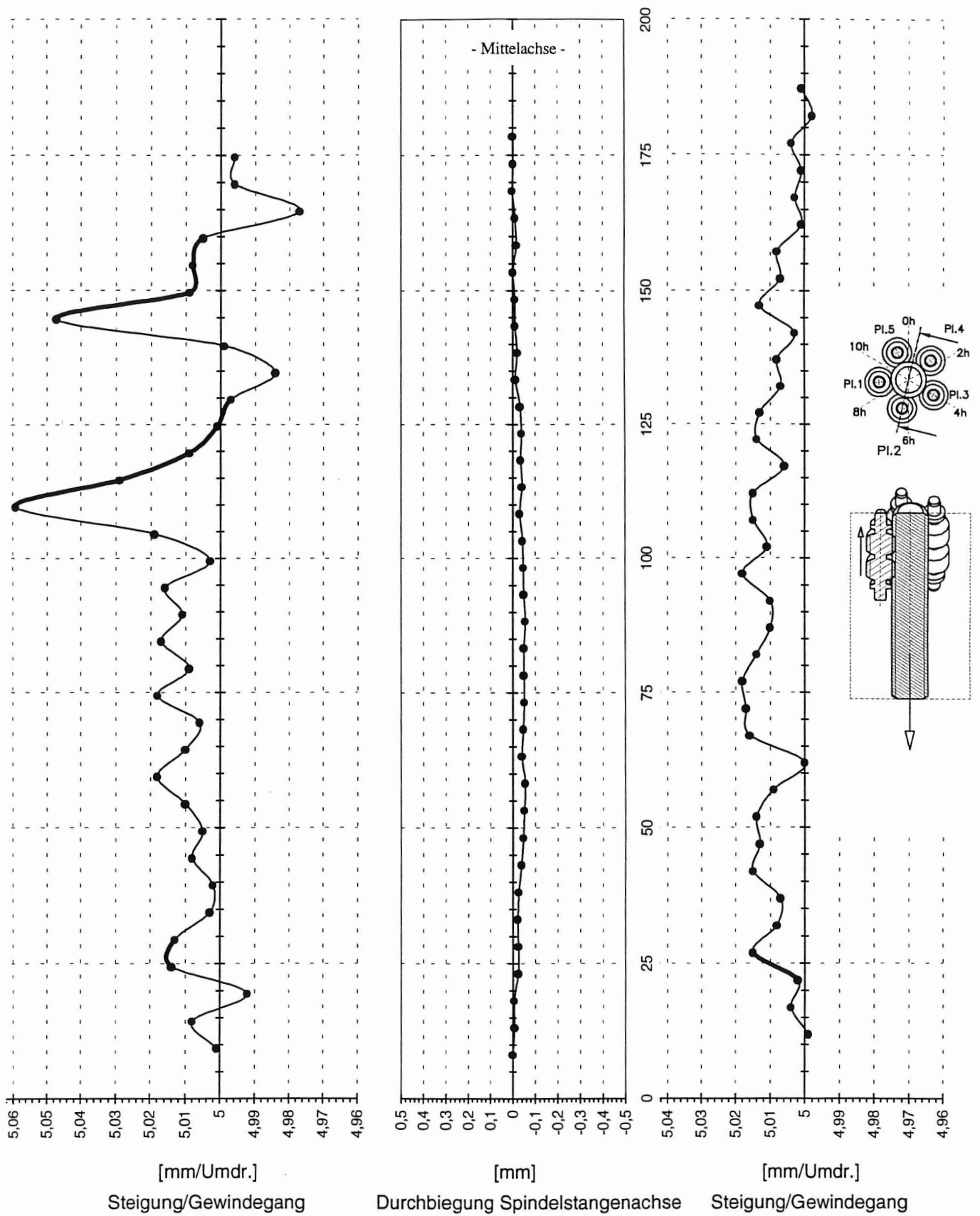


Bild 6.1.2.6.: Formvermessung der Spindelstange nach der Belastung in Schnittebene Planet 2 links

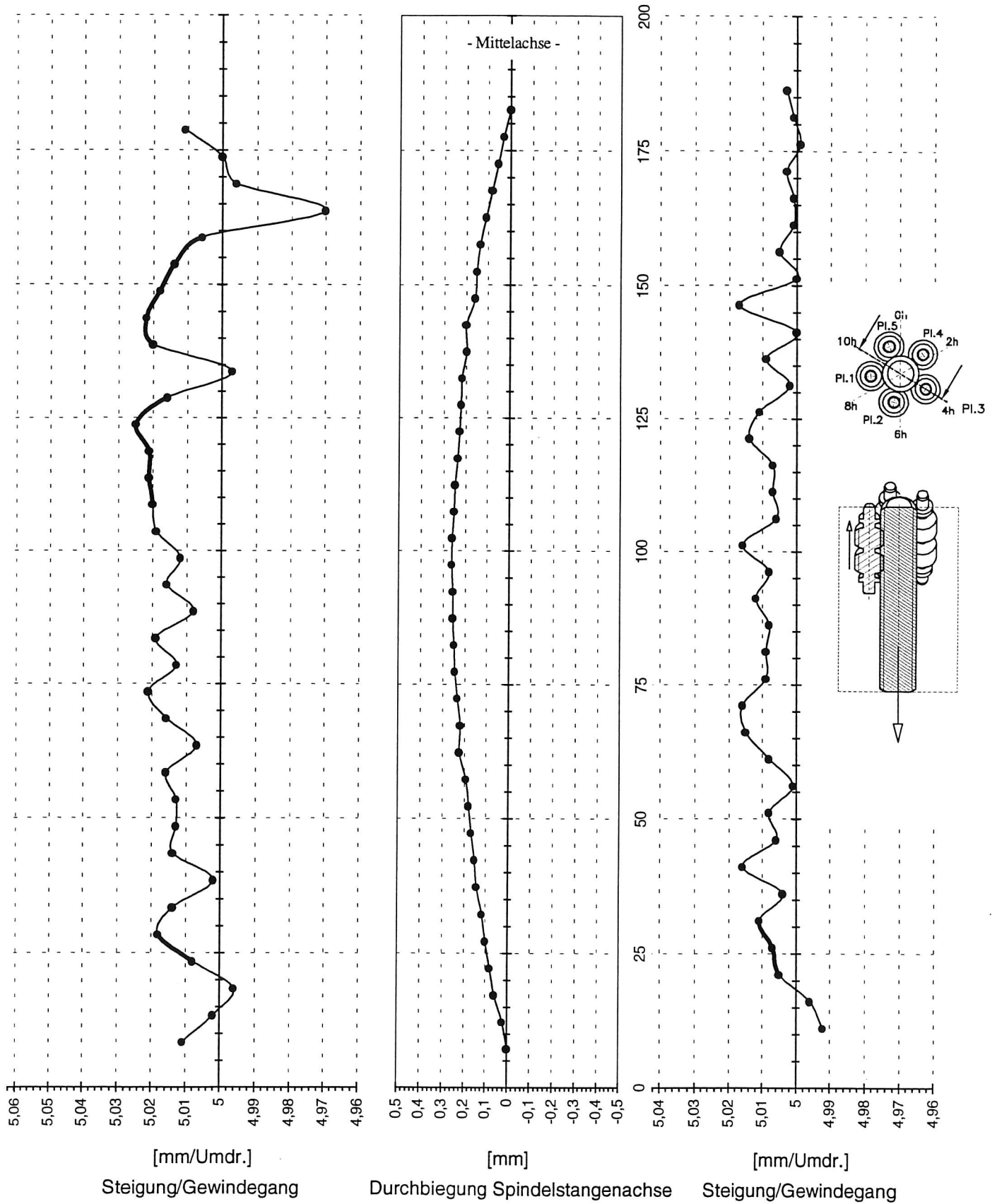


Bild 6.1.2.7.: Formvermessung der Spindelstange nach der Belastung in Schnittebene: Planet 3 links

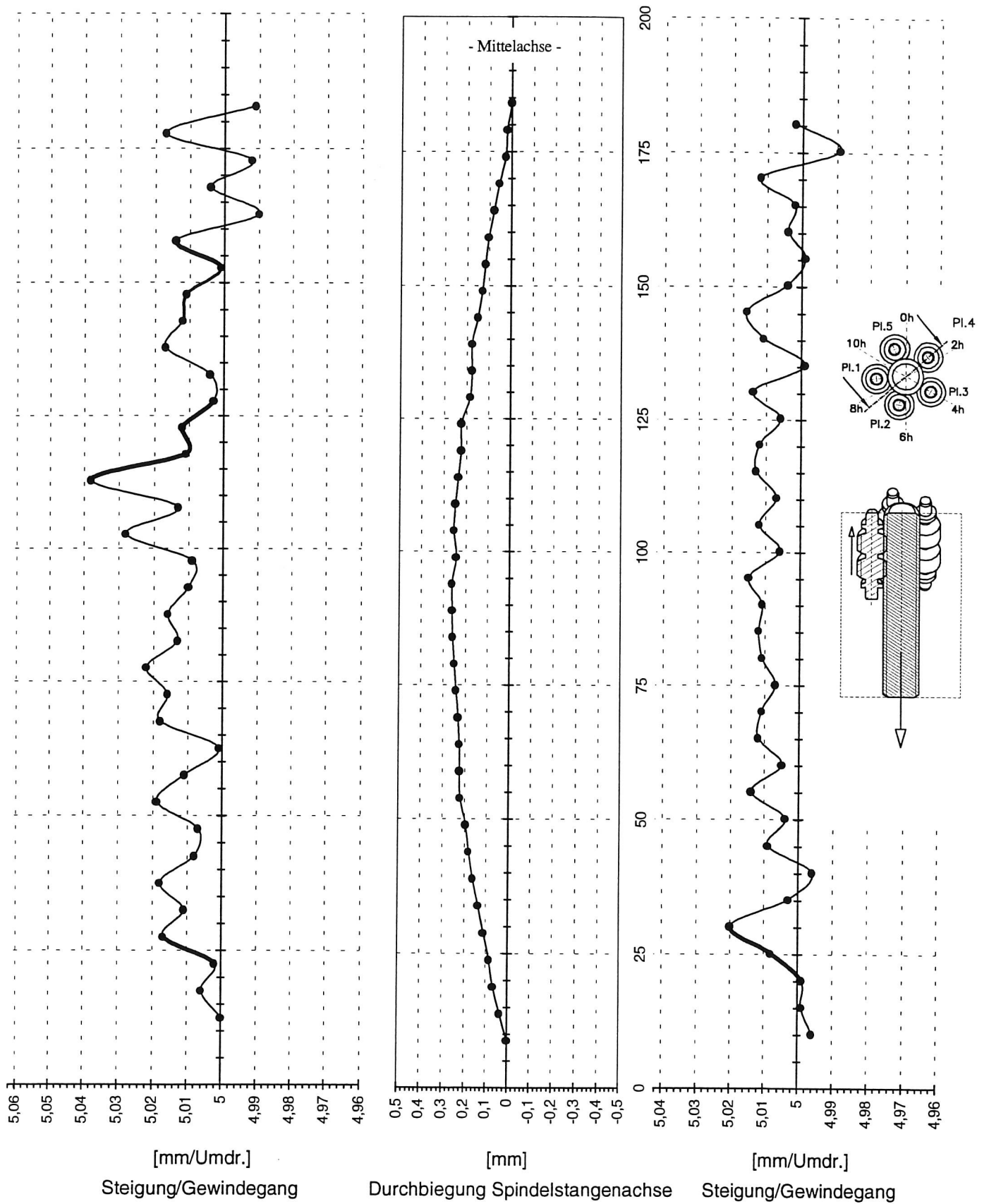


Bild 6.1.2.8.: Formvermessung der Spindelstange nach der Belastung in Schnittebene Planet 4 links

→ (Bild 6.1.2.10.) Stellt man die Meßwerte der Steigung in einem Diagramm überlagert dar, erkennt man die Verformungsbandbreite der Spindelstange und des Gewindes. Die Extremwerte in den Diagrammen zeigen die für die Auslegung der PWG relevanten Orte auf der Spindelstange. Demnach sind die Gewindegänge im Bereich der Kontaktpunkte besonders genau zu untersuchen.

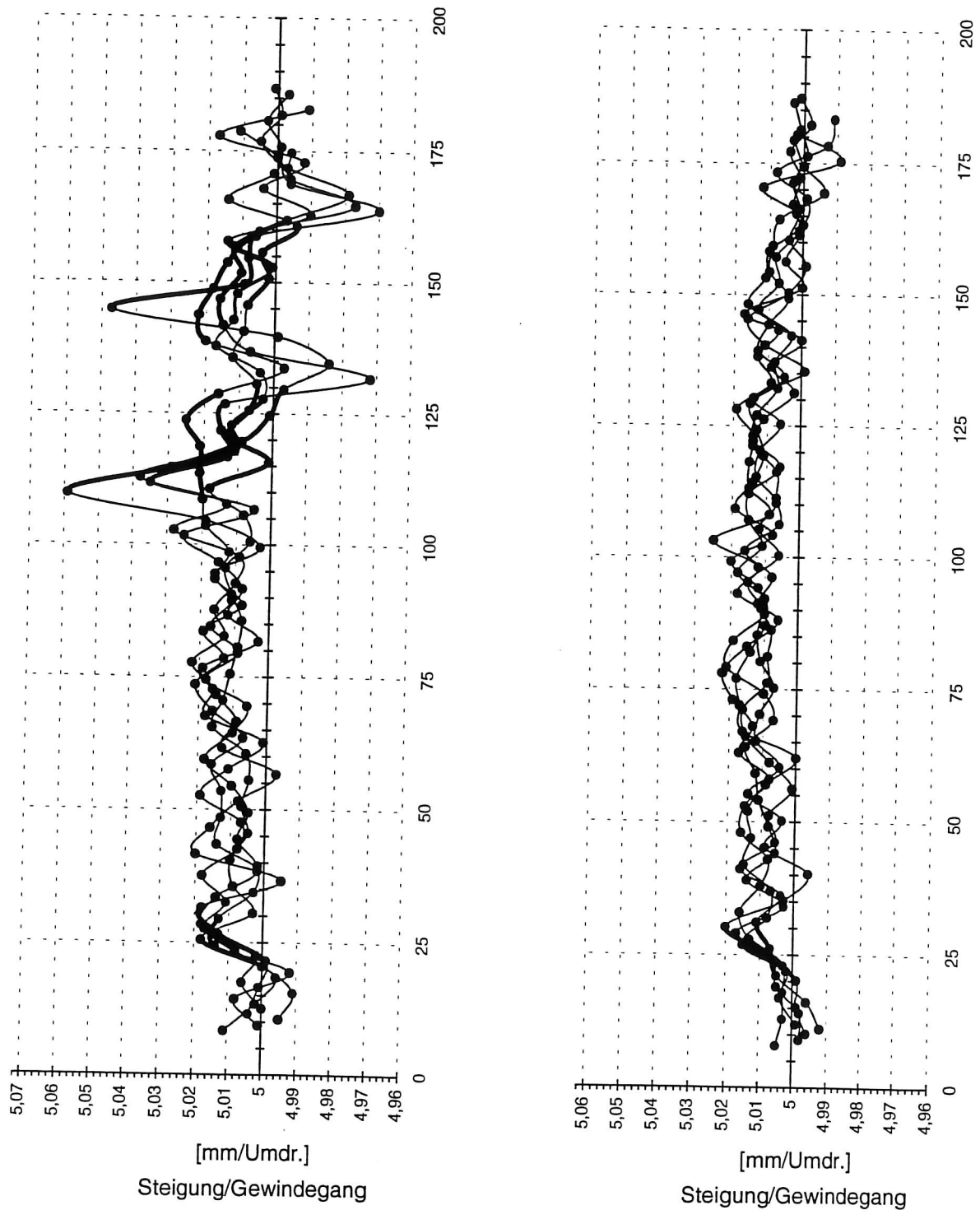
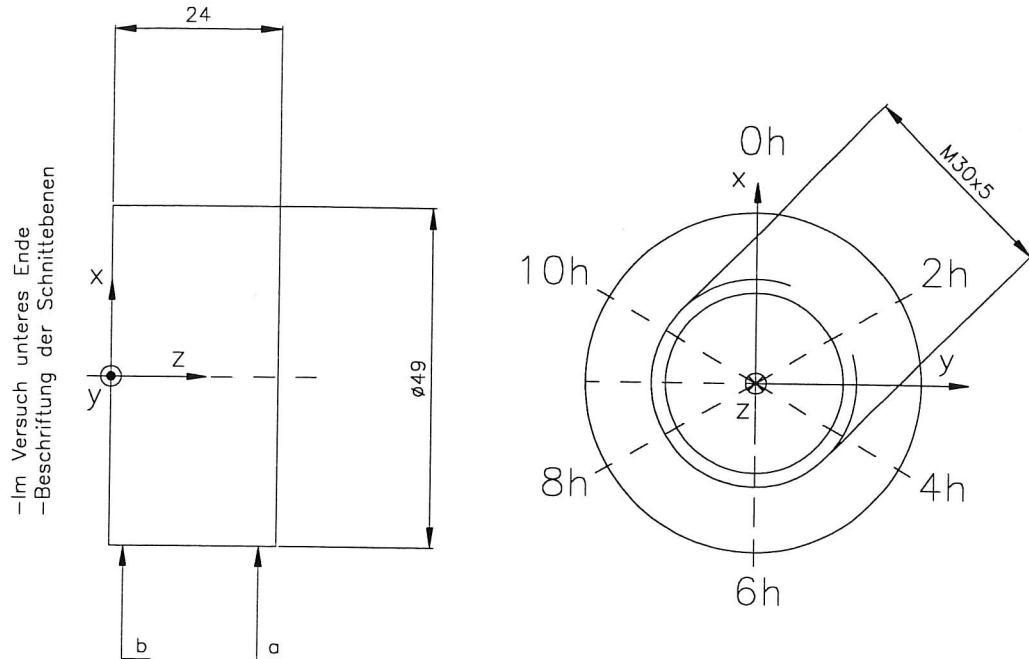


Bild 6.1.2.10.: Überlagerung der Steigungs- bzw Dehnungsdiagramme der Schnittebenen Planet 1 bis 5

→ (Bild 6.1.2.11.) Der Außen- und der Innendurchmesser an der Stelle a der Normmutter hat um 0,02mm bis 0,04mm zugenommen, d. h. die Kontaktkräfte in den tragenden Gewindegängen haben eine Aufweitung um max. 0,8% hervorgerufen.



		0h		2h		4h		6h		8h		10h	
		v	n	v	n	v	n	v	n	v	n	v	n
Außen-Ø: [mm]	a	49,15	49,19	49,16	49,18	49,16	49,18	= 0h		= 2h		= 4h	
	b	49,15	49,15	49,15	49,14	49,16	49,14						
Länge:[mm]		24,01	24,01	24,01	24,00	24,01	24,00	24,01	24,00	24,01	24,01	24,01	24,01
Steigung: [mm/Umdr.]	1Umdr.	5,01	5,03	5,07	4,86	5,06	5,09	4,91	5,09	5,01	4,83	4,99	4,98
	2Umdr.	4,78	4,82	5,13	4,88	5,32	5,07	4,86	5,12	4,89	4,92	4,99	5,01
Innen-Ø: [mm]	a	24,48	24,52	24,48	24,50	24,48	24,51	= 0h		= 2h		= 4h	
	b	24,48	24,50	24,49	24,50	24,49	24,49						

Gewicht: 38,6g

Bild 6.1.2.11.: Meßprotokoll der Normmutter

6.2. Planeten, Führungsringe

→ Alle Planeten wurden in drei Schnittebenen vermessen, vor der Belastung im Einfrierversuch mittels der Fräsmaschine mit Meßoptik, danach im Profilprojektor. Die Festlegung des Koordinatensystems für die Formvermessung der Planeten zeigt Bild 6.2.1..

→ Die Führungsringe spielen beim Einfrierversuch unter statischer Last nur eine untergeordnete Rolle. Aus diesem Grund und zur Zeitersparnis wurde an den Führungsringen keine Koordinatenmessung durchgeführt.

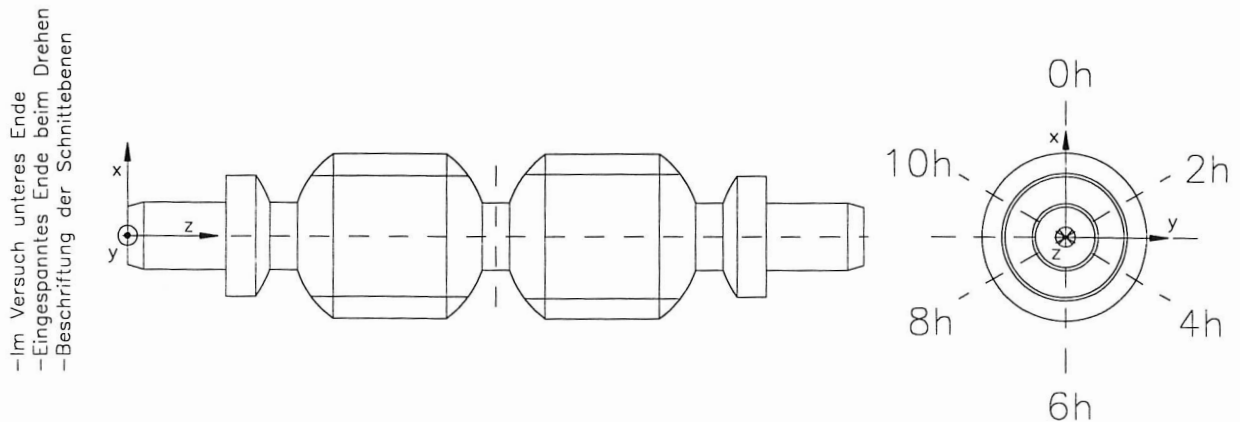


Bild 6.2.1.: Vereinbarung der Koordinaten und der Schnittrichtungen für die Planeten

6.2.1. Vor der Belastung im Einfrierversuch

→ (Bild 6.2.1.1.) Die Flankenform der Planetengewinde ist fehlerhaft gefertigt. Die Zustellung beim Gewindedrehen wurde im 30° -Winkel zur Senkrechten auf die Mittelachse vorgenommen, wodurch mit dem Formdrehmeißel nur eine Flanke konvex abgebildet wurde. Die andere Flanke ist durch die Spitze des Formdrehmeißel gerade, mit dem Winkel der Zustellung von 30° , erzeugt worden. Die Auswirkung auf die Lage der Kontaktpunkte ist extrem ungünstig, weil es zum sogenannten Spitzentragen kommen kann. Im Versuch werden die Planeten in der PWG derart montiert, daß die Last über die korrekt gefertigten Flanken läuft.

⇒ Die Zustellung muß in den letzten Schnitten senkrecht zur Drehachse (z-Achse) durchgeführt werden, damit die Kontur beider Flanken abgebildet wird. Dabei wird die Spanbreite extrem groß, was hohe Schnittkräfte und schlechten Spanfluß bedeutet. Eine Möglichkeit, die Spanbreite klein zu halten, ist mit 2 Drehmeißeln zu arbeiten, die jeweils nur eine Flanke abbilden. Am günstigsten ist ein sehr spitzer Drehmeißel, mit dem man die Zustellung entlang der Gewindekontur vornehmen kann. Die Anwendung anderer Fertigungsverfahren, wie Gewinderollen, Gewindefräsen oder Gewindeschleifen besitzen ebensolche Vorteile bezüglich geringerer Schnittkräfte.

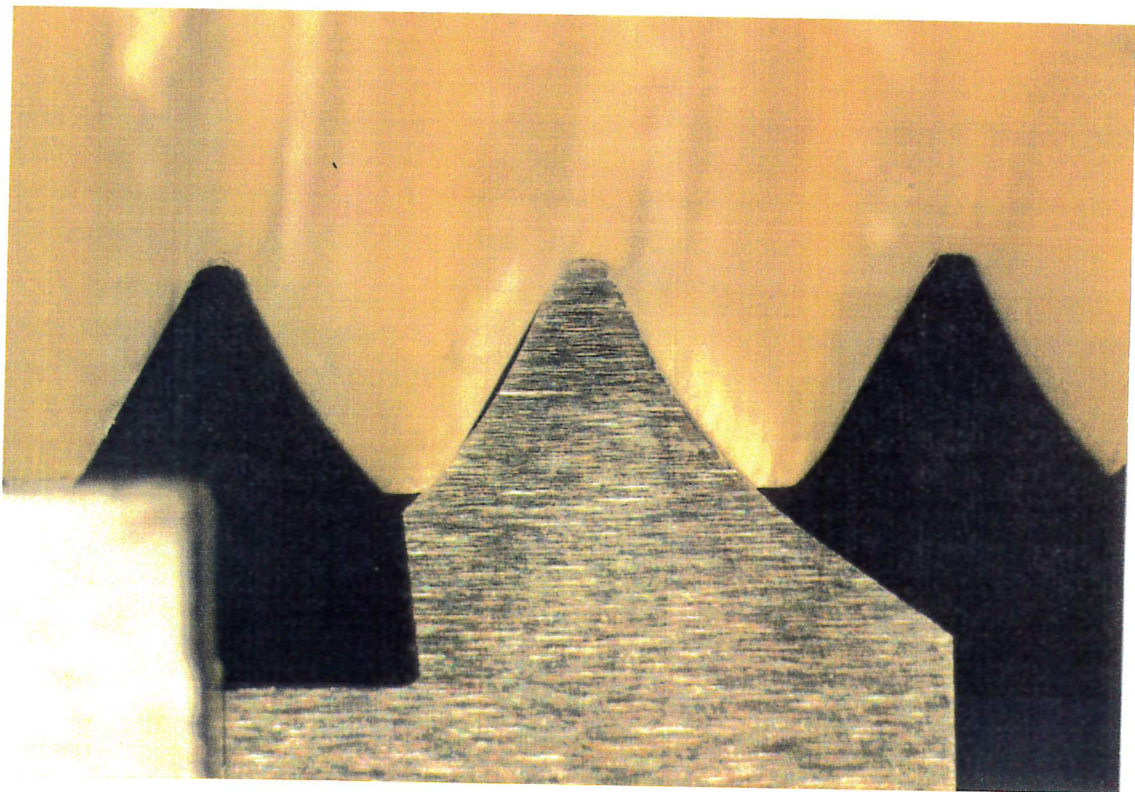


Bild 6.2.1.1.: Fehlerhaftes Gewinde auf den Planeten

→ (Bild 6.2.1.2.) Die Planeten wurden während der Drehbearbeitung nur im Spindel-futter der Drehmaschine eingespannt und nicht mit einer Reitstockspitze gestützt. Die Schnittkräfte bewirkten eine elastische Durchbiegung der Planeten, so daß der Kontur der Planeten eine konische Formabweichung überlagert ist. Die Durchmesser am freien Ende sind ca. 0,2mm (2%) größer als am eingespannten Ende (siehe Anhang Meßprotokolle).

⇒ Die elastische Verformung der Planeten während der Drehbearbeitung kann durch Verwendung eines Reitstocks oder einer gegenüber mitlaufenden Spindel verringert werden. Die Schnittkräfte können durch geringe Zustellung und angepaßte Schneidengeometrien minimiert werden.

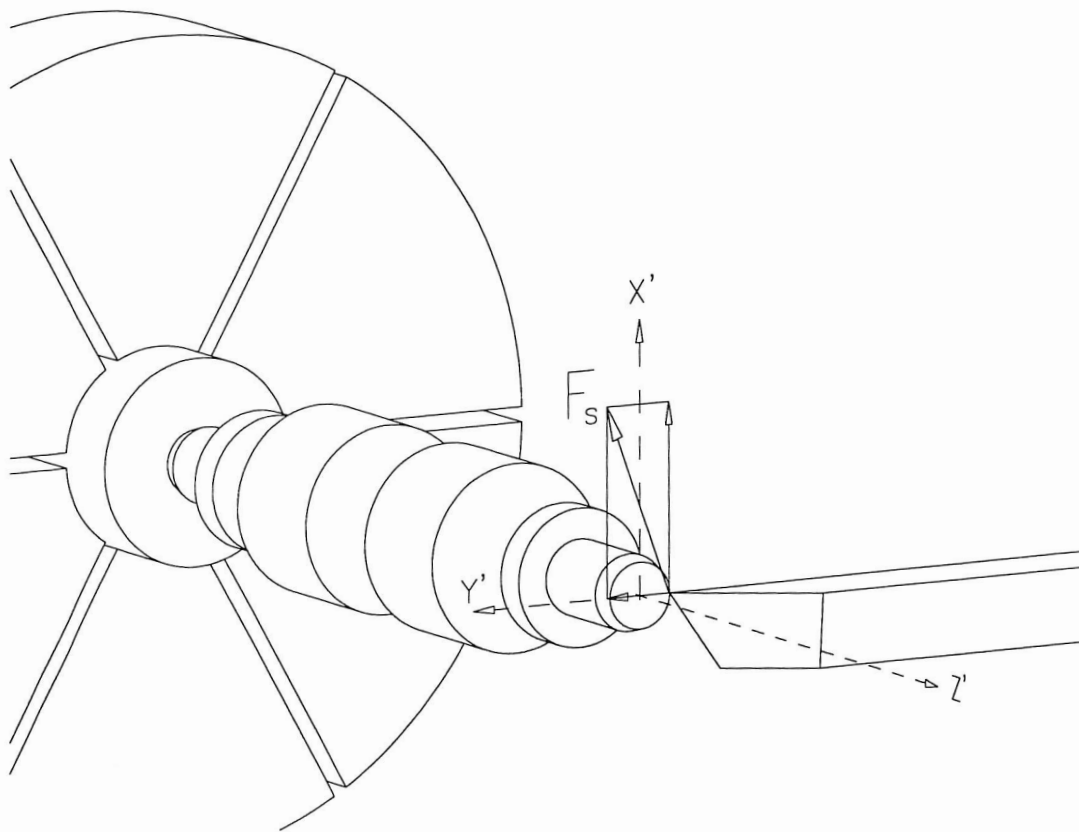


Bild 6.2.1.2.: Schnittkräfte in der x-y-Ebene beim Drehen der Planeten

→ (Bild 6.2.1.3.) Die Flächen, auf denen die Planeten mit der Spindelmutter in Be-rührung kommen, sind Kugelteilflächen. Die Durchmesser dieser Kugeln lassen sich in den vermessenen Schnitten in der CAD-Auswertung bestimmen (siehe Anhang Meßprotokolle). Die Durchmesser der Kugelteilflächen, deren Flächen während der Bearbeitung vom Drehmaschinenfutter weggezeigt haben, sind exakt gefertigt. Die gegenüberliegenden Flächen weisen zu große Krümmungsradien auf. Diese Abflachung wurde beim Drehen mit einem unsymmetrischen Drehmeißel verursacht. Es kann auch hier

Spitzentragen mutterseitig auftreten und es ergeben sich unterschiedliche Wälzkreisdurchmesser.

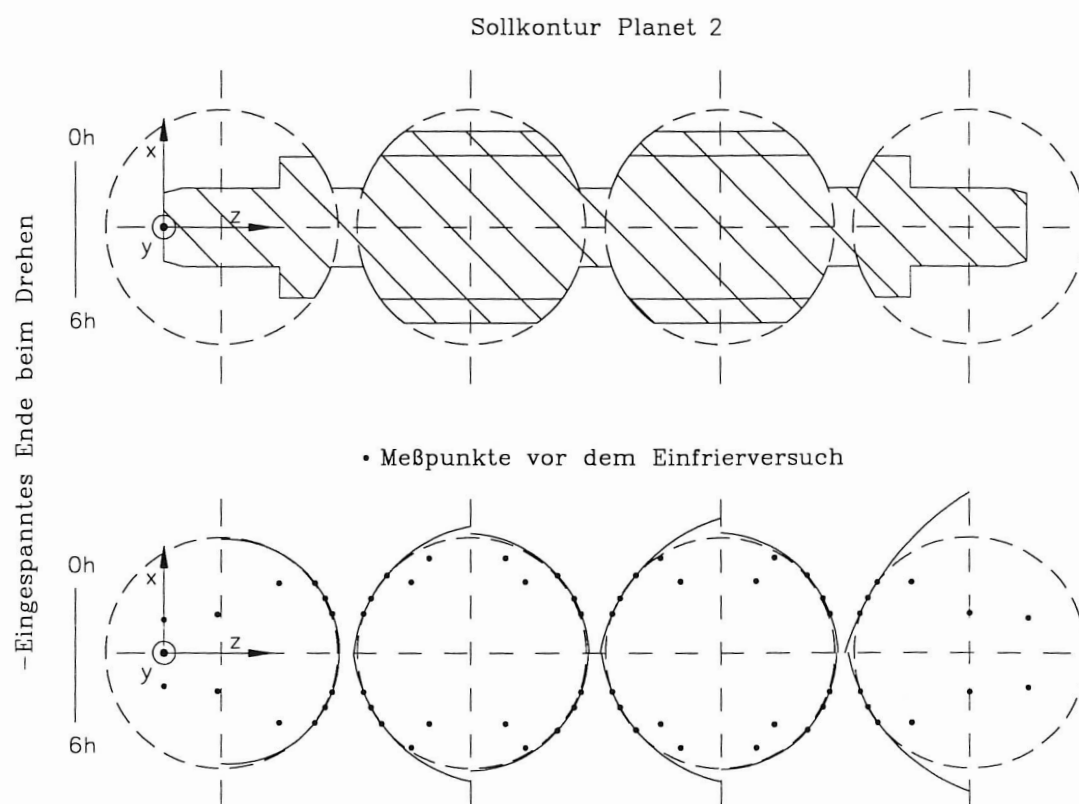


Bild 6.2.1.3.: Beispiel: Gegenüberstellung von Sollkontur und Kreisbögen aus Koordinatenmeßwerten am Planet 2, Schnitt 0h-6h

→ (Bild 6.2.1.4. und 6.2.1.5.) Die Planeten wälzen nicht gleichmäßig in der Mutter ab und verkippen gegenüber ihrer achsparallelen Lage zur Mutter und zur Spindelstange (Verschränken, siehe Kapitel 4.2.2.). Die Größe des Verschränkungswinkels ist abhängig vom Spiel der Planeten zwischen Spindelstange und Spindelmutter, von der Drehrichtung der Spindelstange und von elastischen Verformungen.

⇒ Durch Verwendung zweier Drehmeißel mit spiegelbildlicher Geometrie für die sich gegenüberliegenden Kugelflächen könnten die Konturen exakt erzeugt werden.

→ (Bild 6.2.1.6. und 6.2.1.7.) Die Fotos der Planeten 1 und 2 zeigen die oben genannten Formfehler. Die auffällig raue Oberflächenbeschaffenheit beeinträchtigt lediglich die Durchsichtigkeit der Modellbauteile aus Araldit-B, was die Untersuchung im Polariscope erschwert. Der Einfluß auf die Kontaktgeometrien ist vernachlässigbar.

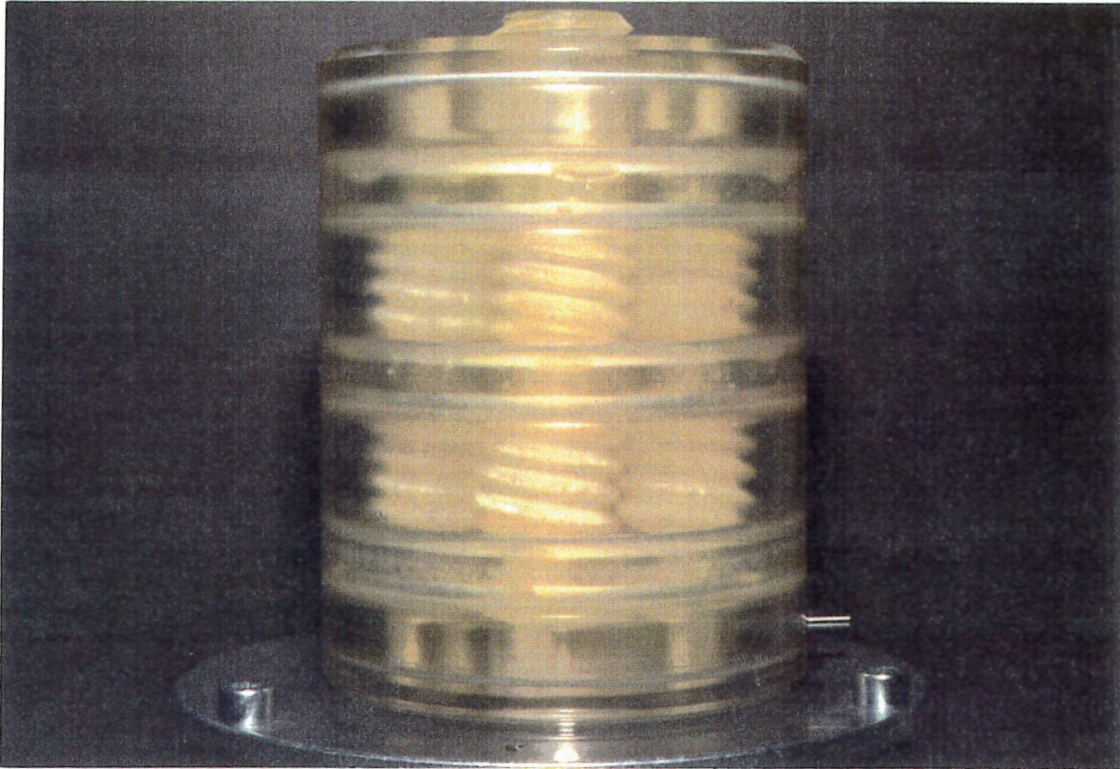


Bild 6.2.1.4.: Verschränkung der Planeten, Drehrichtung von z-Koordinate=0 gesehen rechts

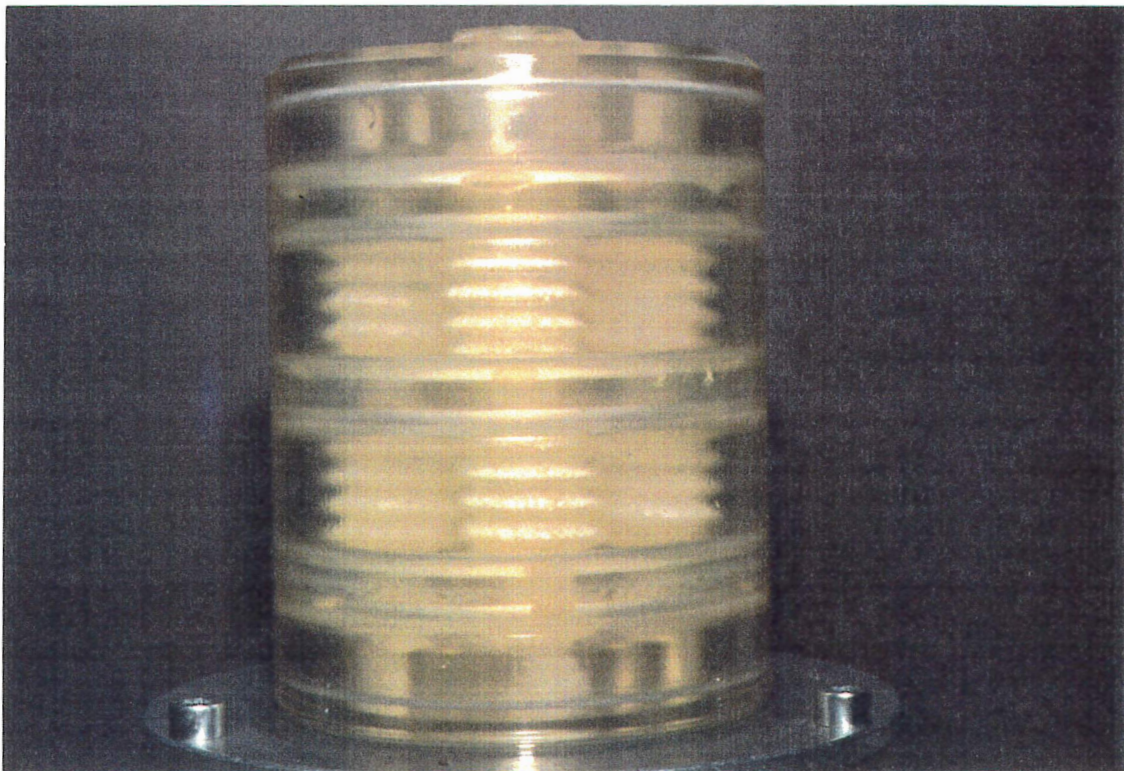
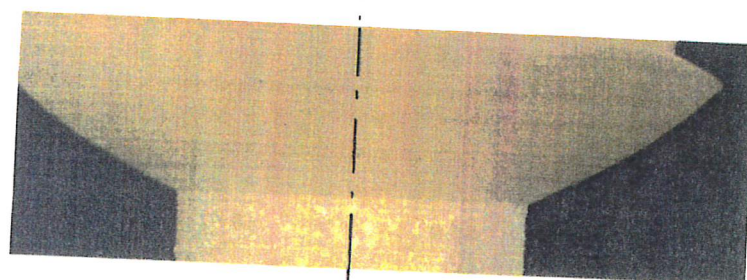
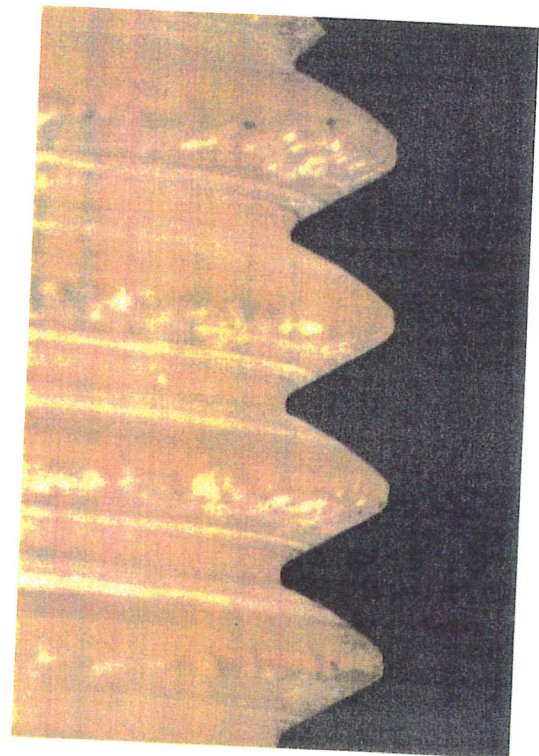
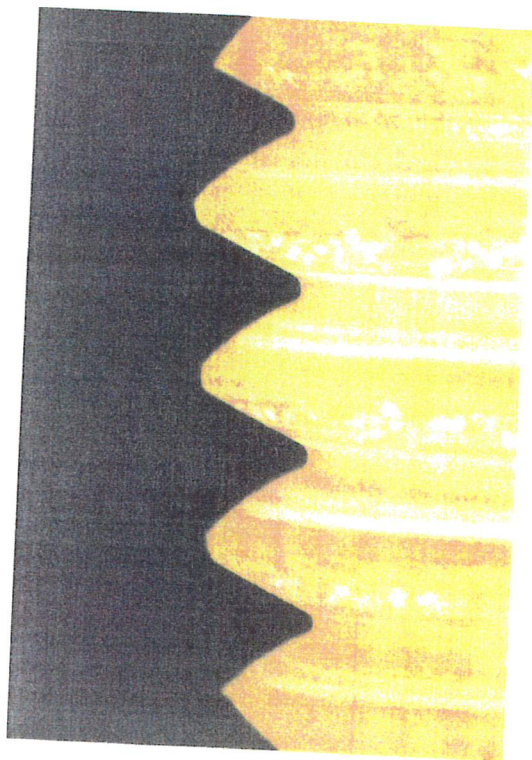
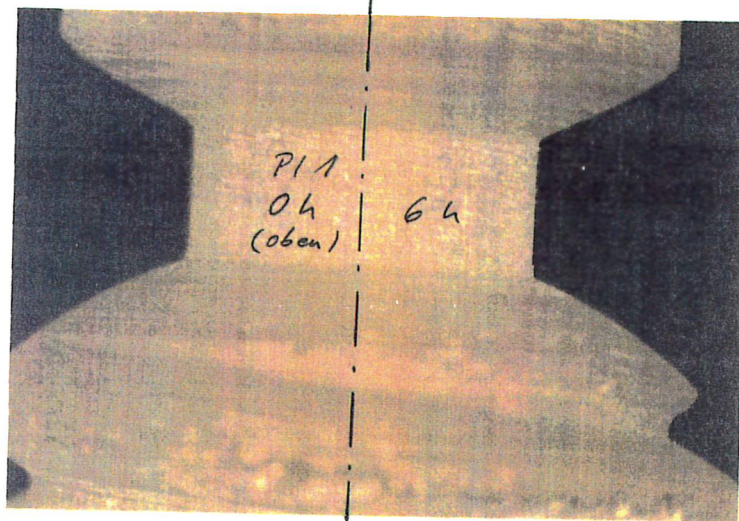


Bild 6.2.1.5.: Verschränkung der Planeten, Drehrichtung von z-Koordinate=0 gesehen links



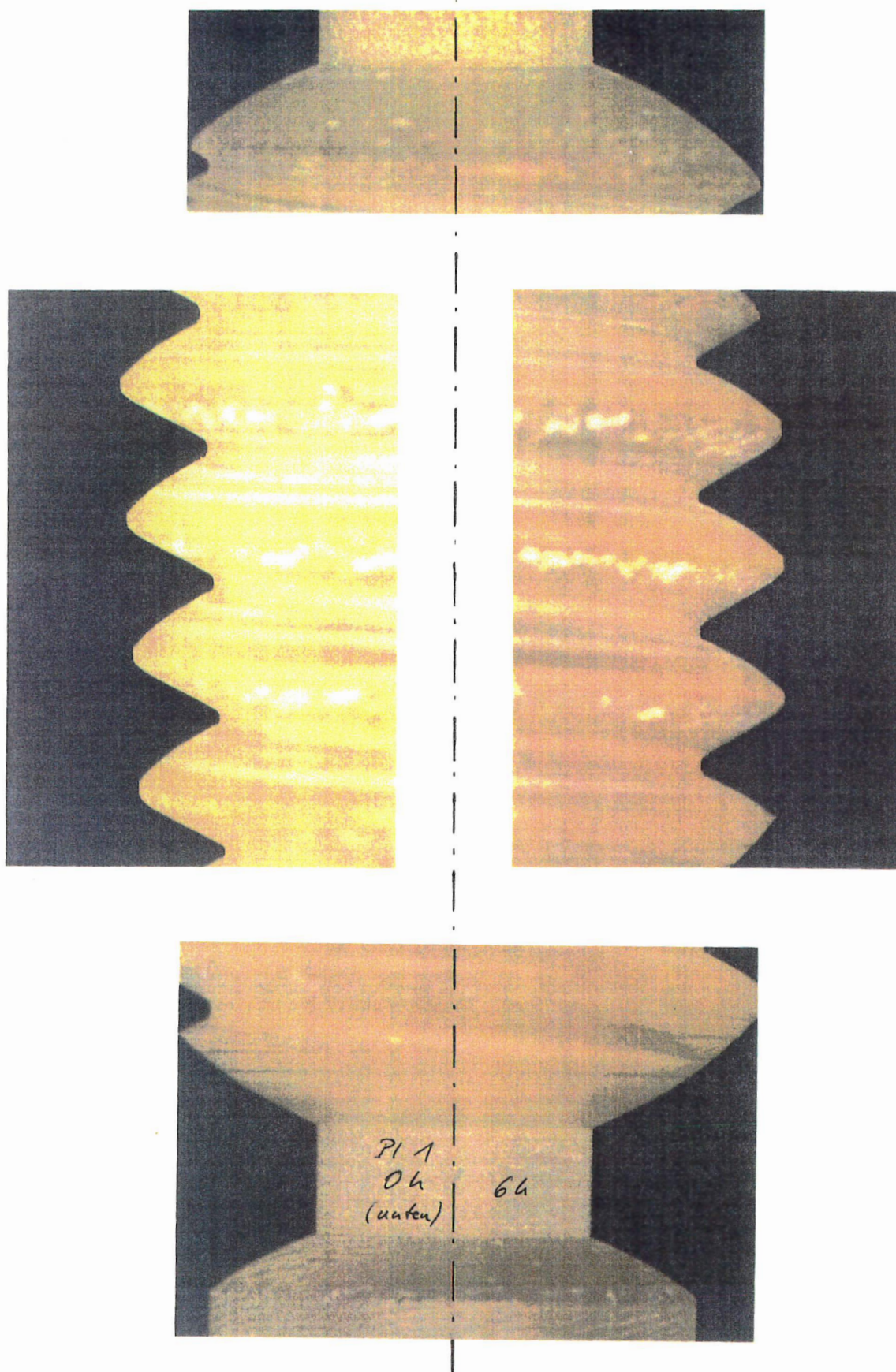
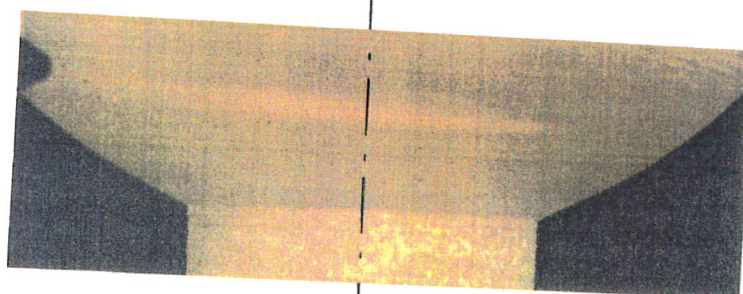
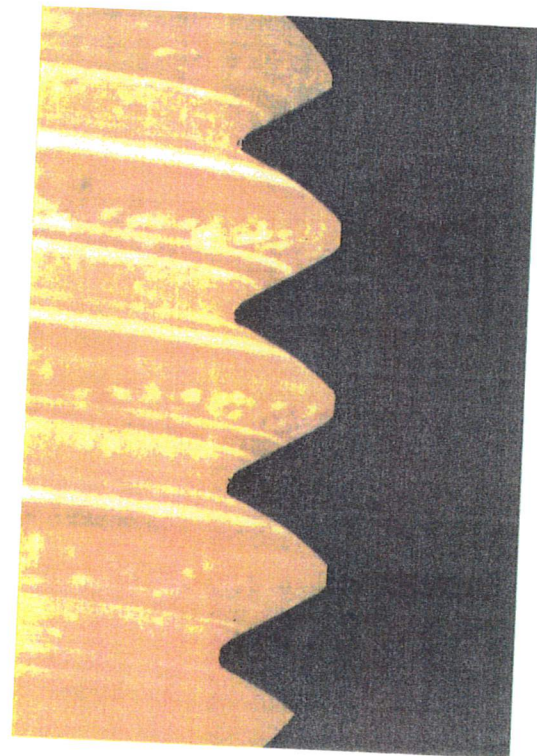
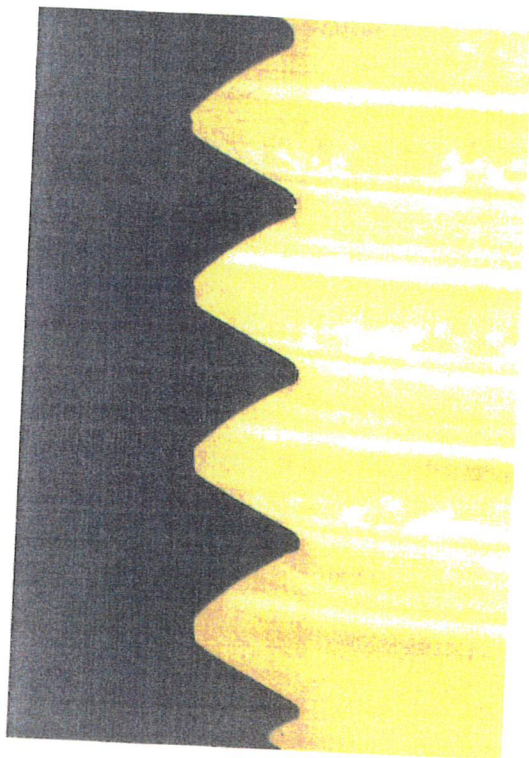
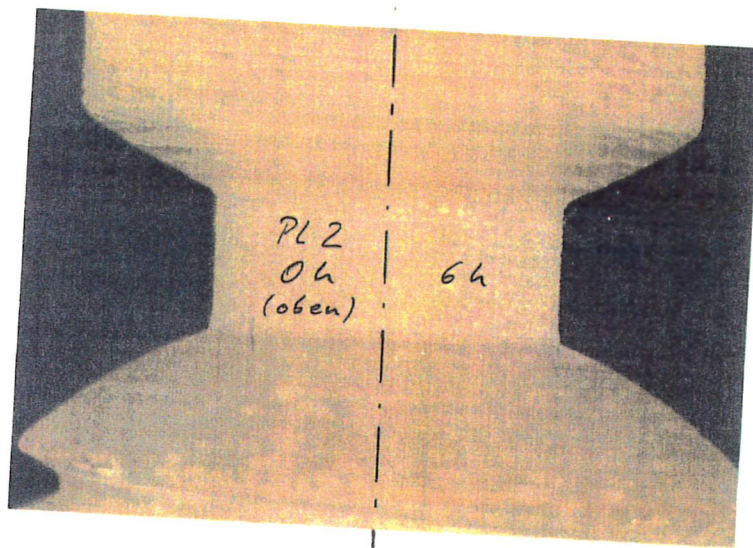


Bild 6.2.1.6.: Konturen des Planeten 1 im Schnitt Oh-6h



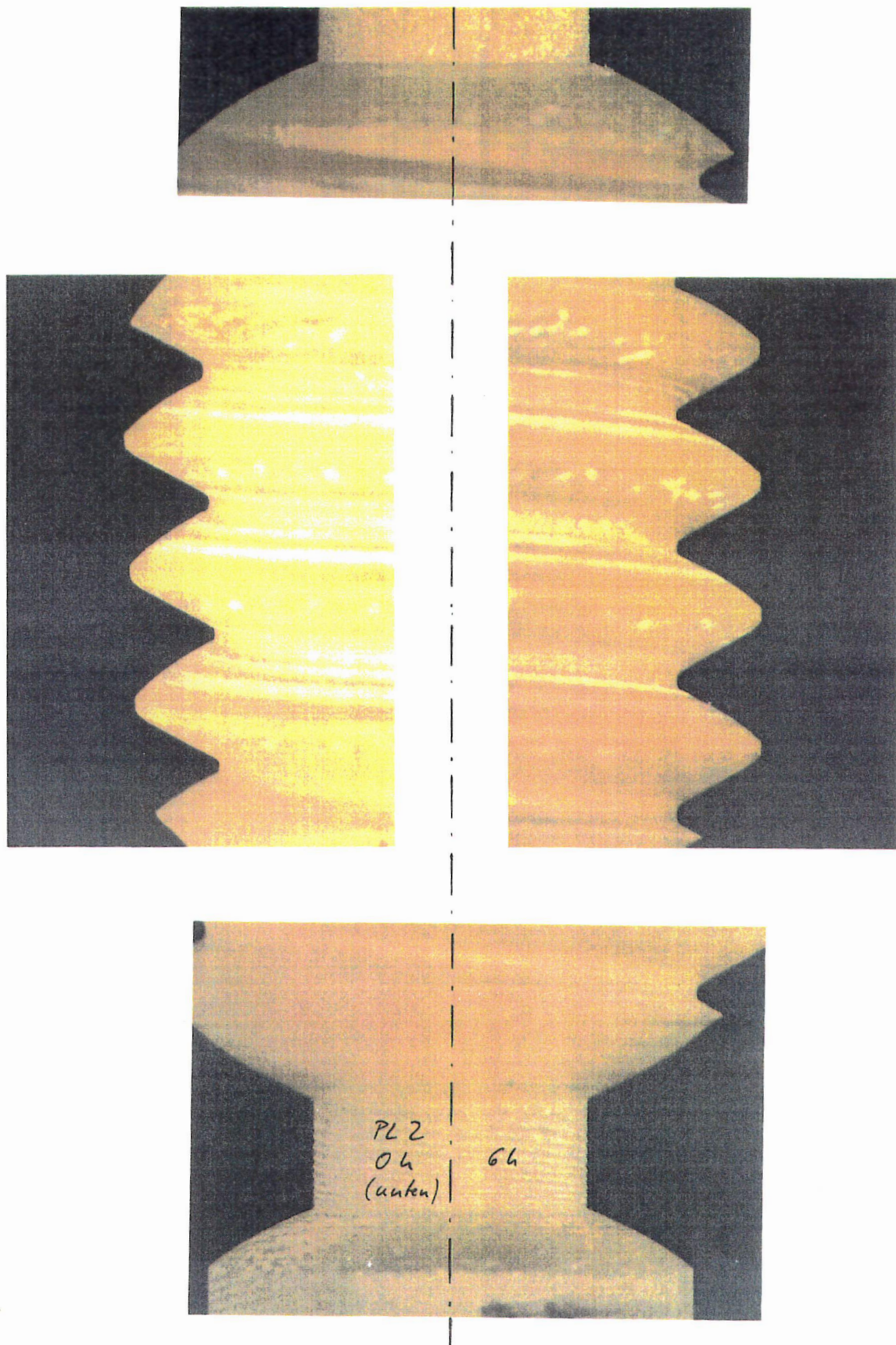


Bild 6.2.1.7.: Konturen des Planeten 2 im Schnitt 0h-6h

6.2.2. Nach der Belastung im Einfrierversuch

→ Die Verformungen der Planeten sind wesentlich kleiner als die der Spindelstange und lassen sich nicht mehr genau genug bestimmen. Die Größe des Meßfehlers ist gleich der zu messenden Größe.

Spannungsoptische Auswertung im Polariskop

→ (Bild 6.2.2.1. bis 6.2.2.17) Der spannungsoptische Effekt ist auch bei den Planeten aufgrund der kleinen Dehnungen gering ausgefallen, eine Auswertung von Schnitten aus den Planeten ist nicht sinnvoll. Es ist nicht möglich, Spannungen direkt aus den Isochromatenordnungen abzulesen. Möglich ist die Bestimmung der Lastverteilung auf die Kontaktpunkte längs der Planetenachse nach Abschätzung der höchsten Isochromatenordnung um die Kontaktpunkte. Die eingeprägte axiale Last kann der Isochromatenordnungen entsprechend in Anteile zerlegt und den Kontakten zugeordnet werden. Die Vorhersagen aus der Betrachtung der statischen Bestimmtheit werden bestätigt: Die eingeprägte axiale Last verteilt sich ungleichmäßig auf die fünf Planeten und die möglichen Kontaktpunkte.

→ Bild 6.2.2.1. und 6.2.2.2. geben zunächst an, in welcher Blickrichtung die Fotos aufgenommen wurden. Die Bilder auf den folgenden Seiten zeigen die Isochromaten um die Kontakte Spindelstange-Planeten und Planeten-Mutter. Gefolgt von der graphischen Darstellung der Lastverteilung auf die Kontaktpunkte.

6. Ergebnisse

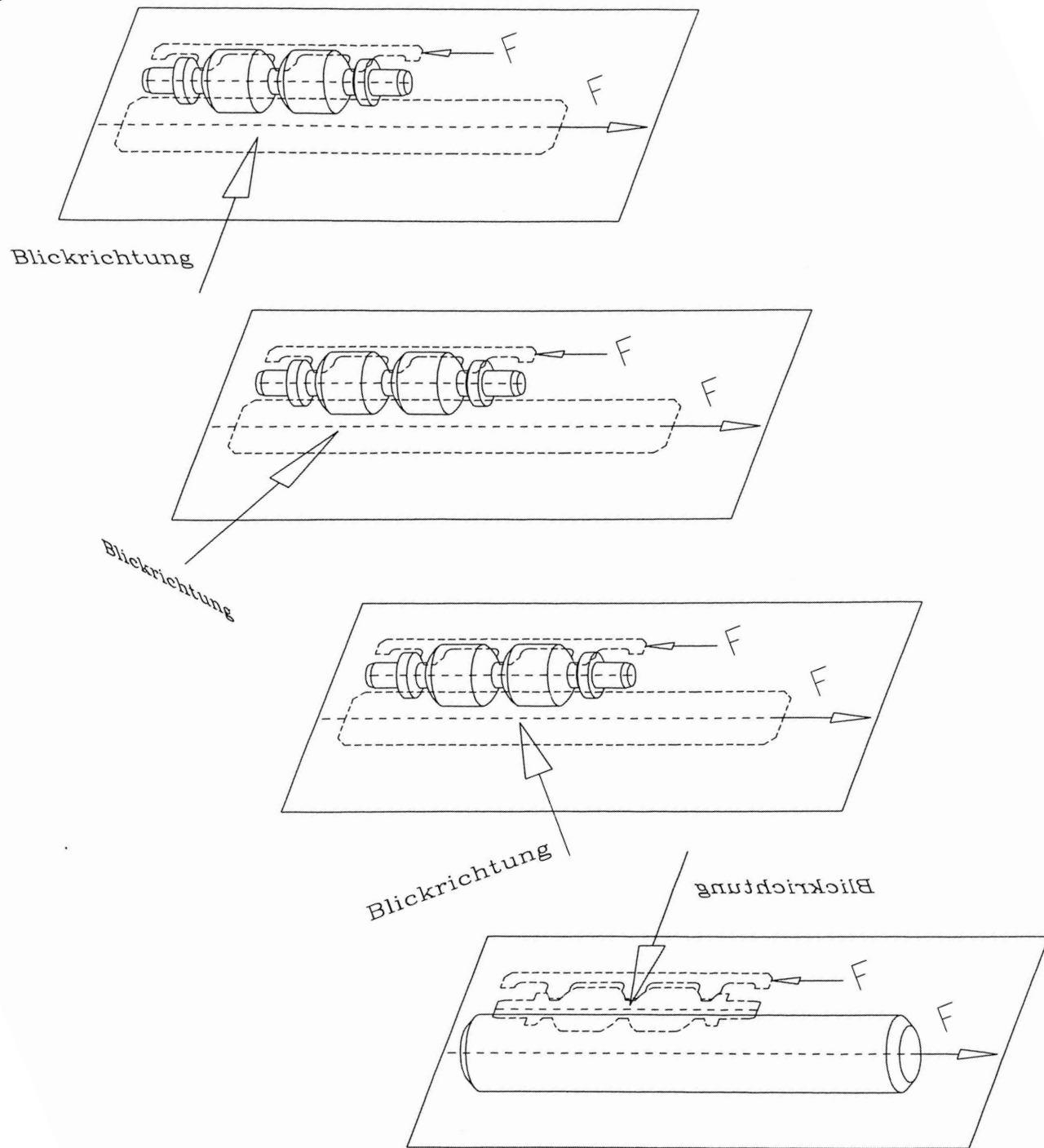


Bild 6.2.2.1.: Blickrichtungen für die Isochromatenaufnahmen in den Kontaktpunkten von Spindelstange zu Planeten

6. Ergebnisse

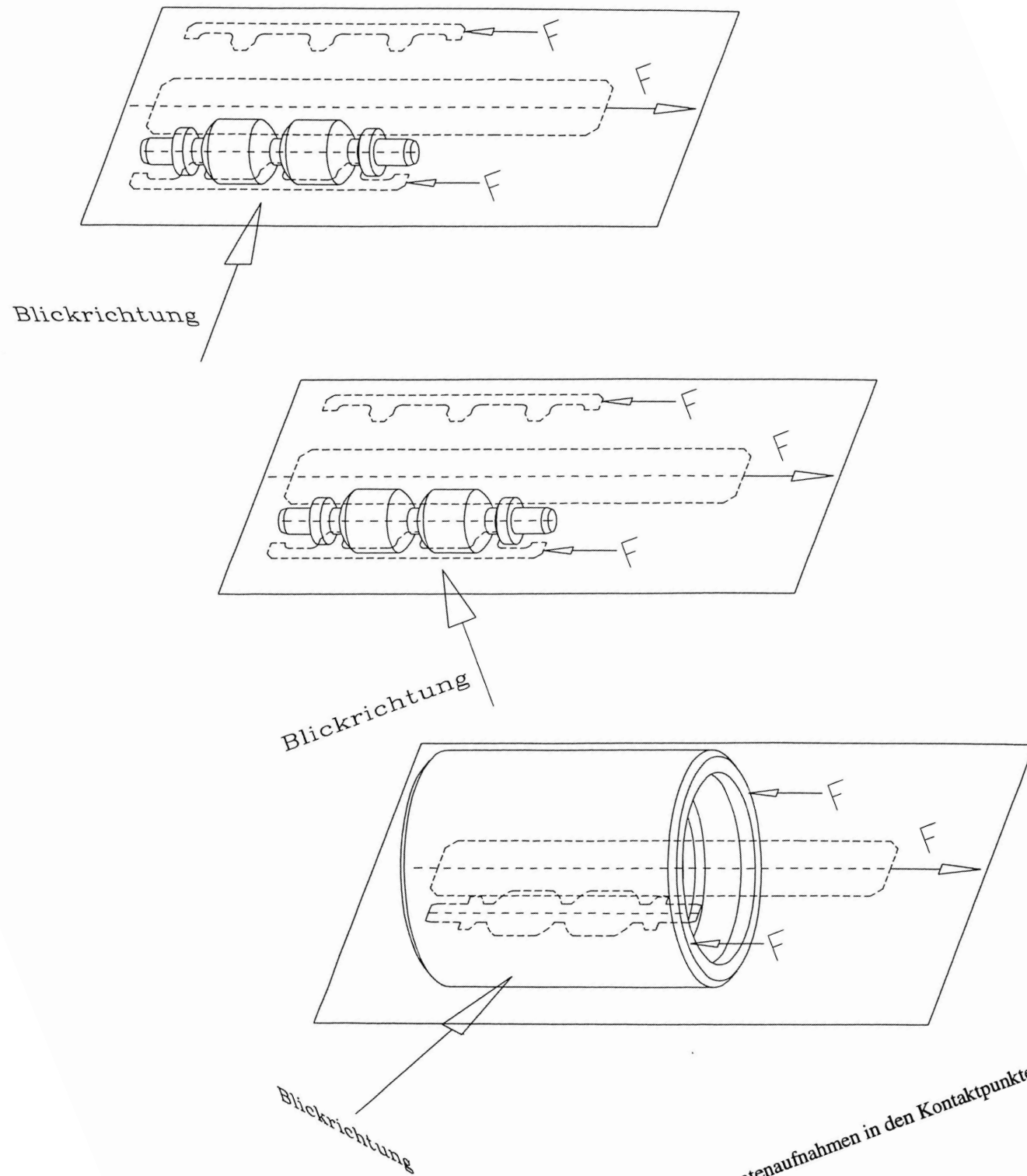


Bild 6.2.2.2.: Blickrichtungen für die Isochromatenaufnahmen in den Kontaktpunkten von Planeten zur Mutter

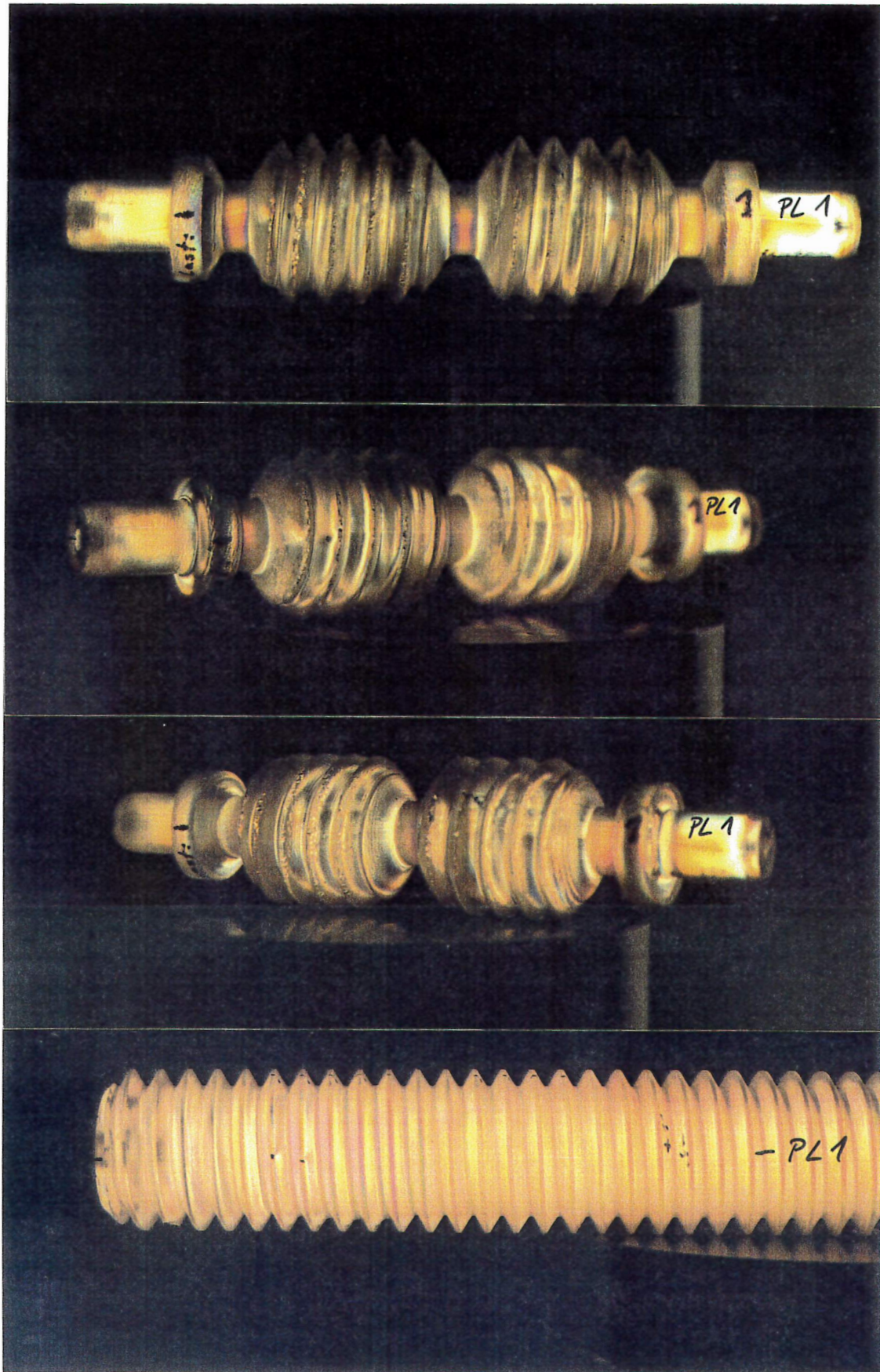


Bild 6.2.2.3.: Isochromaten um die Kontaktpunkte Spindelstange - Planet 1

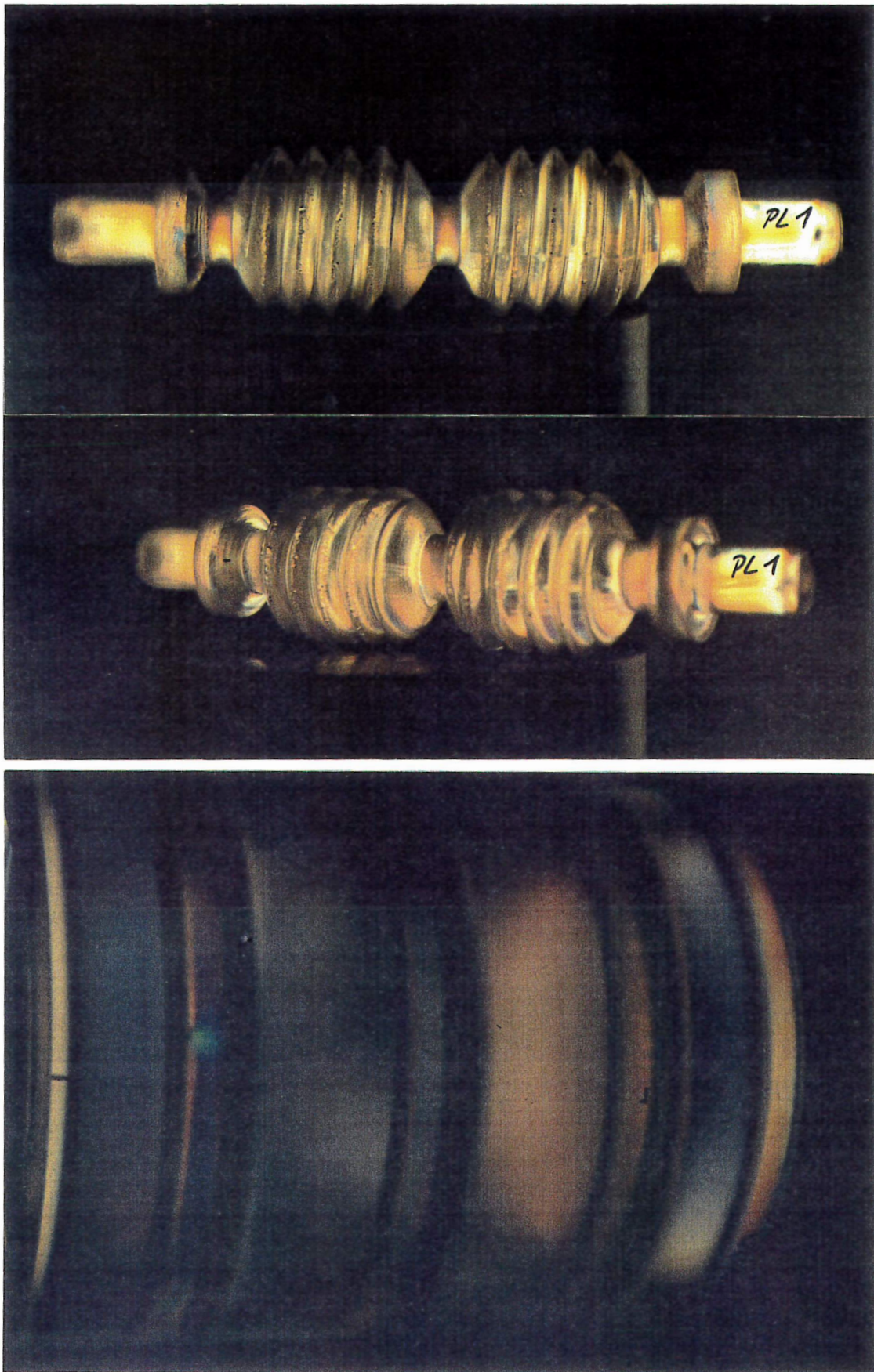


Bild 6.2.2.4.: Isochromaten um die Kontaktpunkte Planet 1 - Mutter

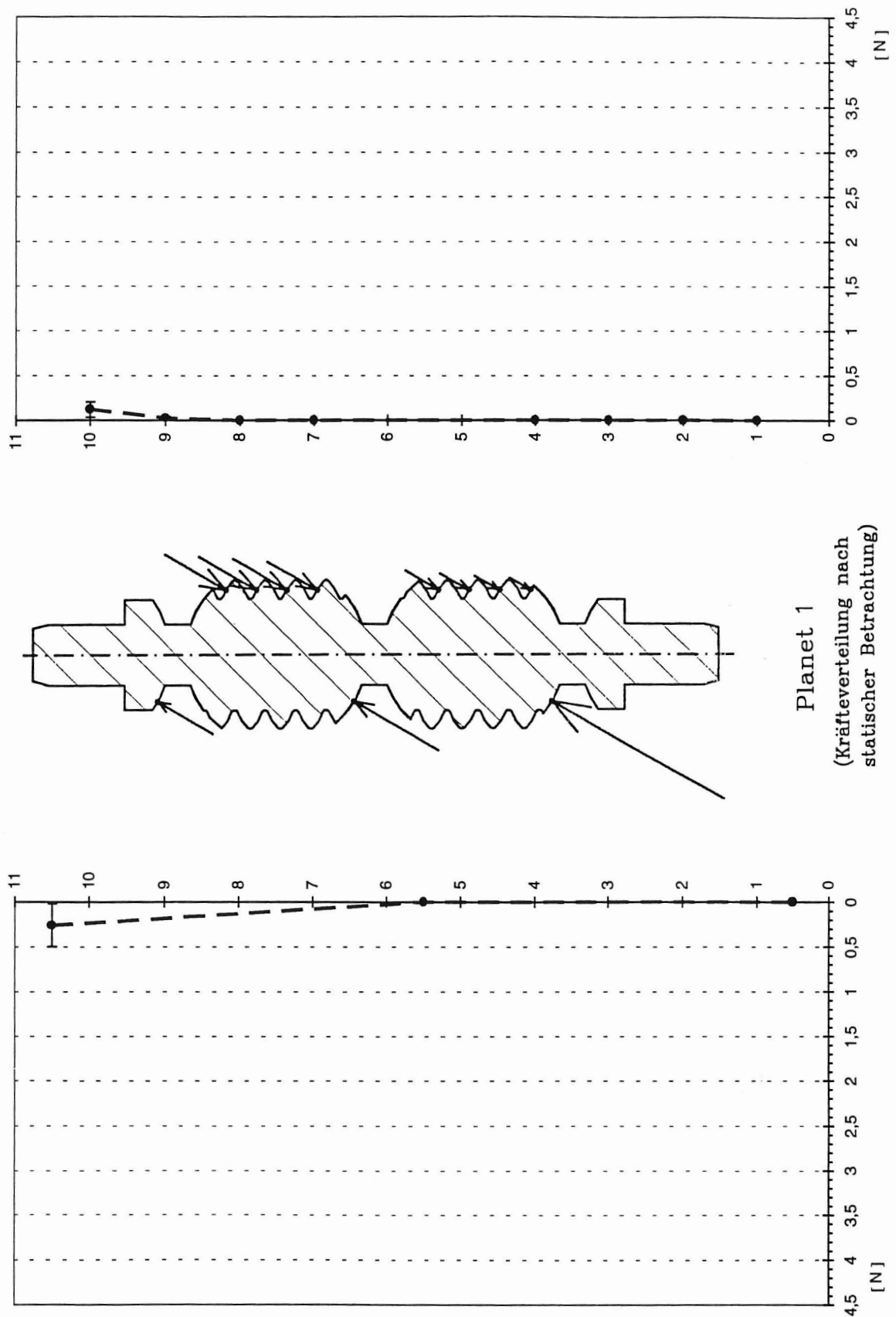


Bild 6.2.2.5.: Kräfteverteilung auf die spindel- und mutterseitigen Kontaktpunkte am Planet 1

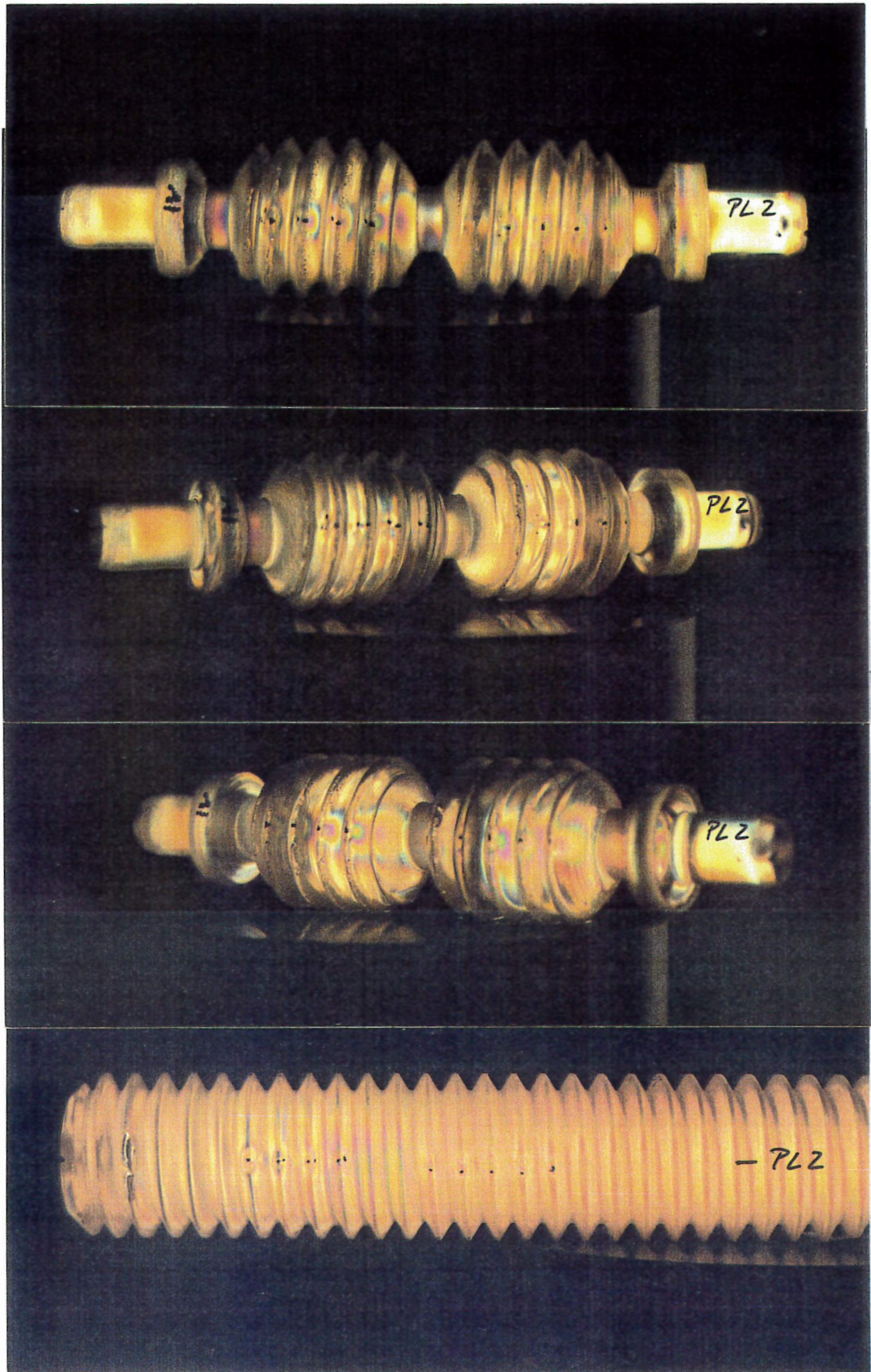


Bild 6.2.2.6.: Isochromaten um die Kontaktpunkte Spindelstange - Planet 2

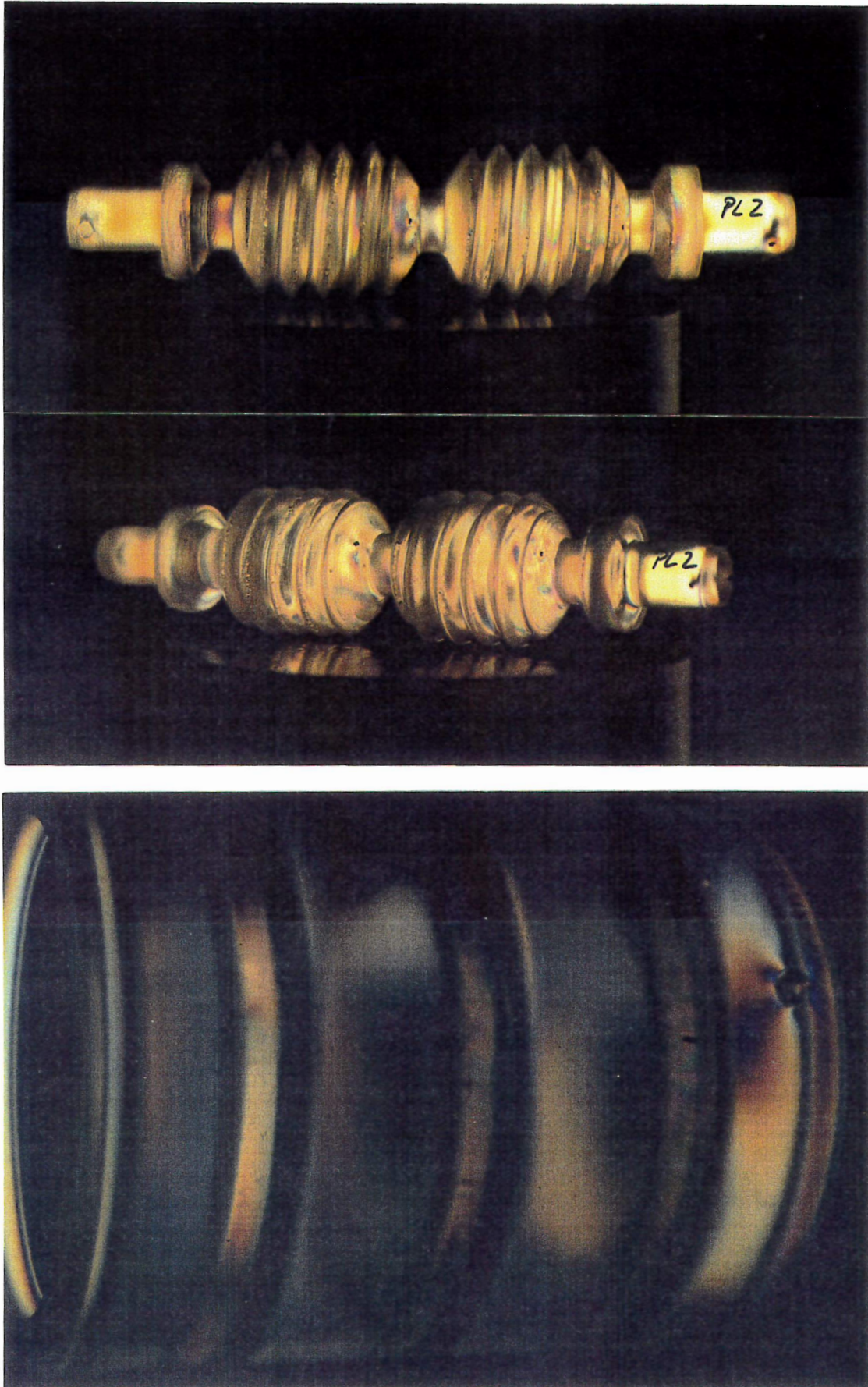


Bild 6.2.2.7.: Isochromaten um die Kontaktpunkte Planet 2 - Mutter

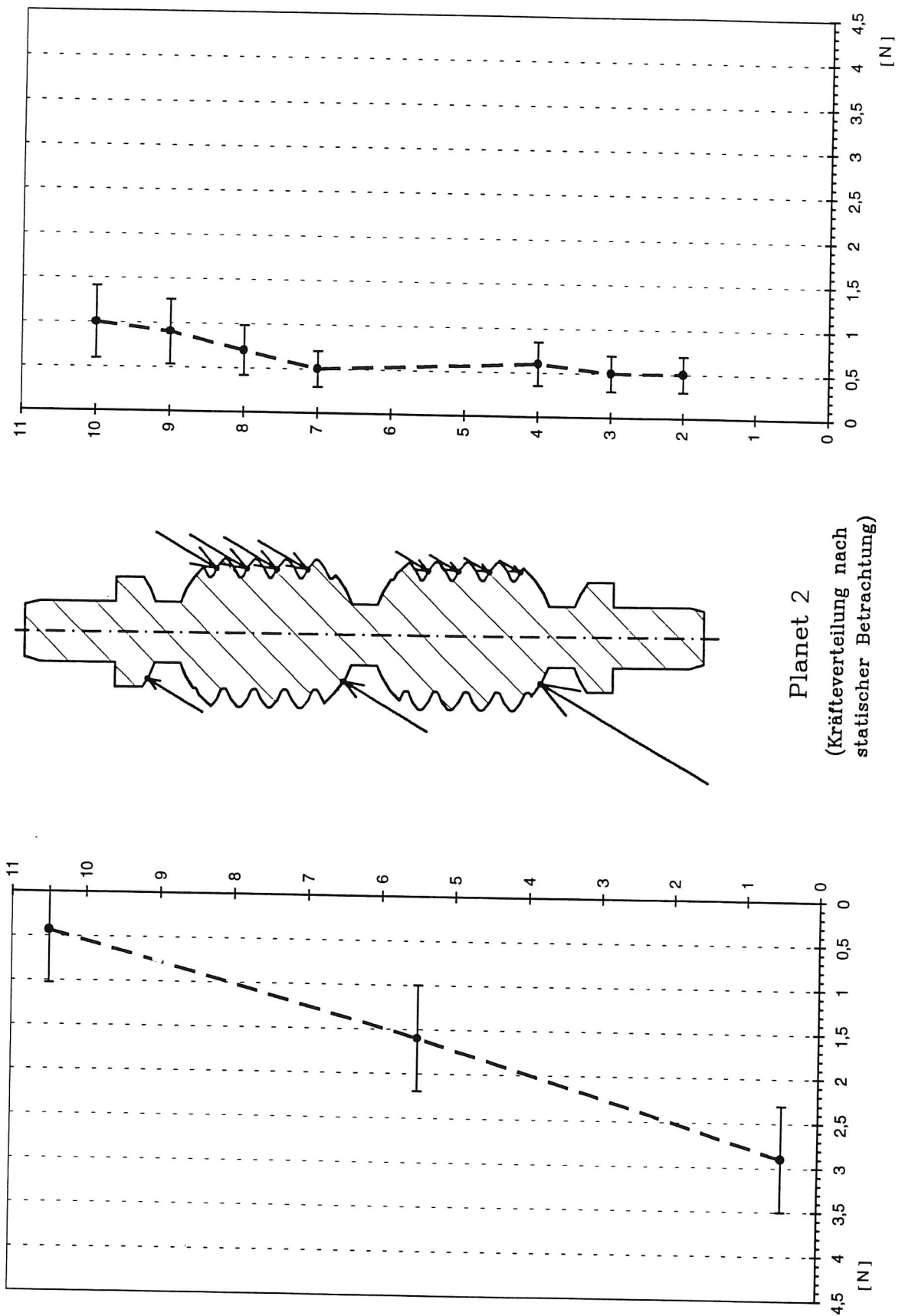


Bild 6.2.2.8.: Kräfteverteilung auf die spindel- und mutterseitigen Kontaktpunkte am Planet 2

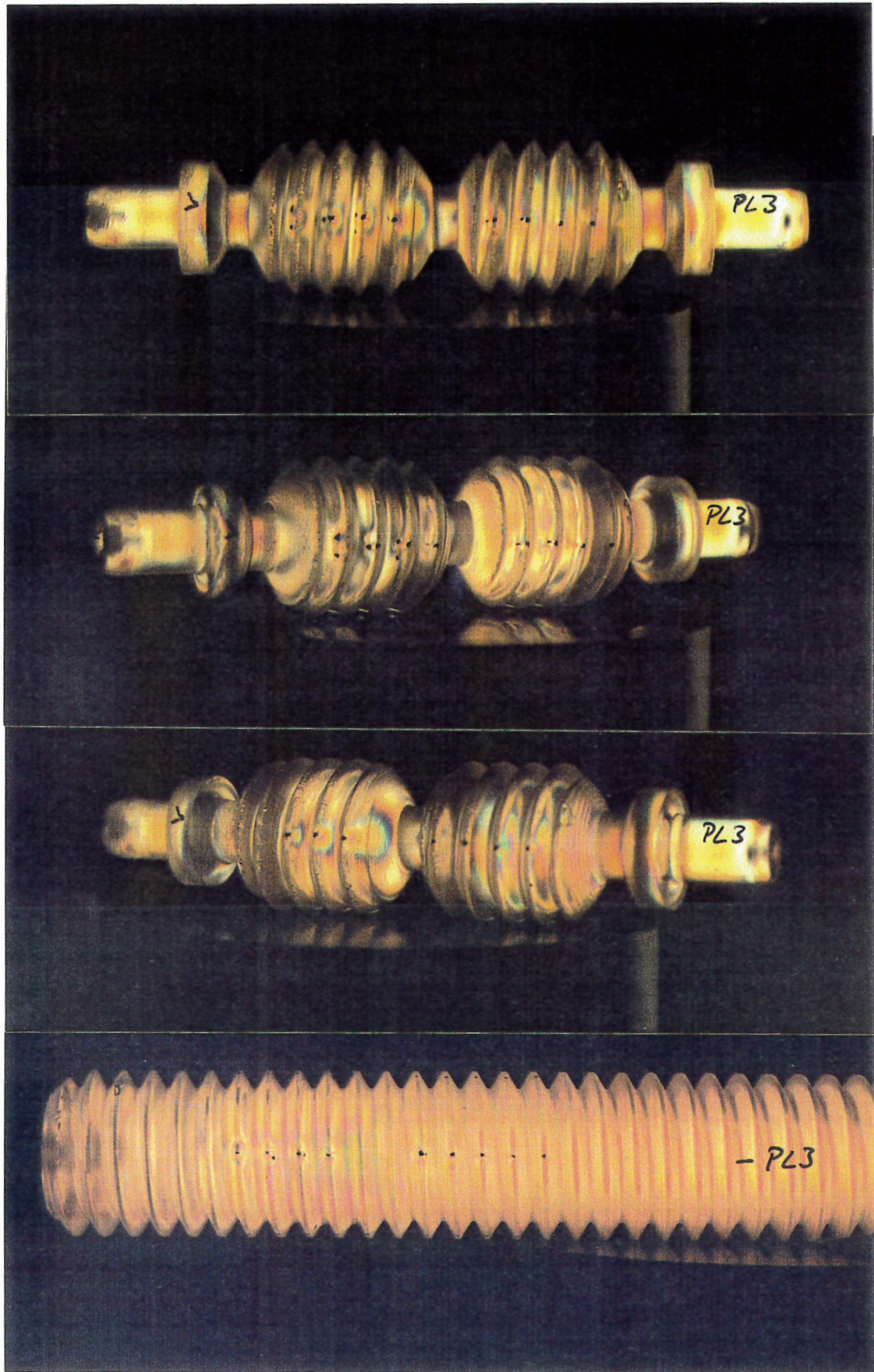


Bild 6.2.2.9.: Isochromaten um die Kontaktpunkte Spindelstange - Planet 3

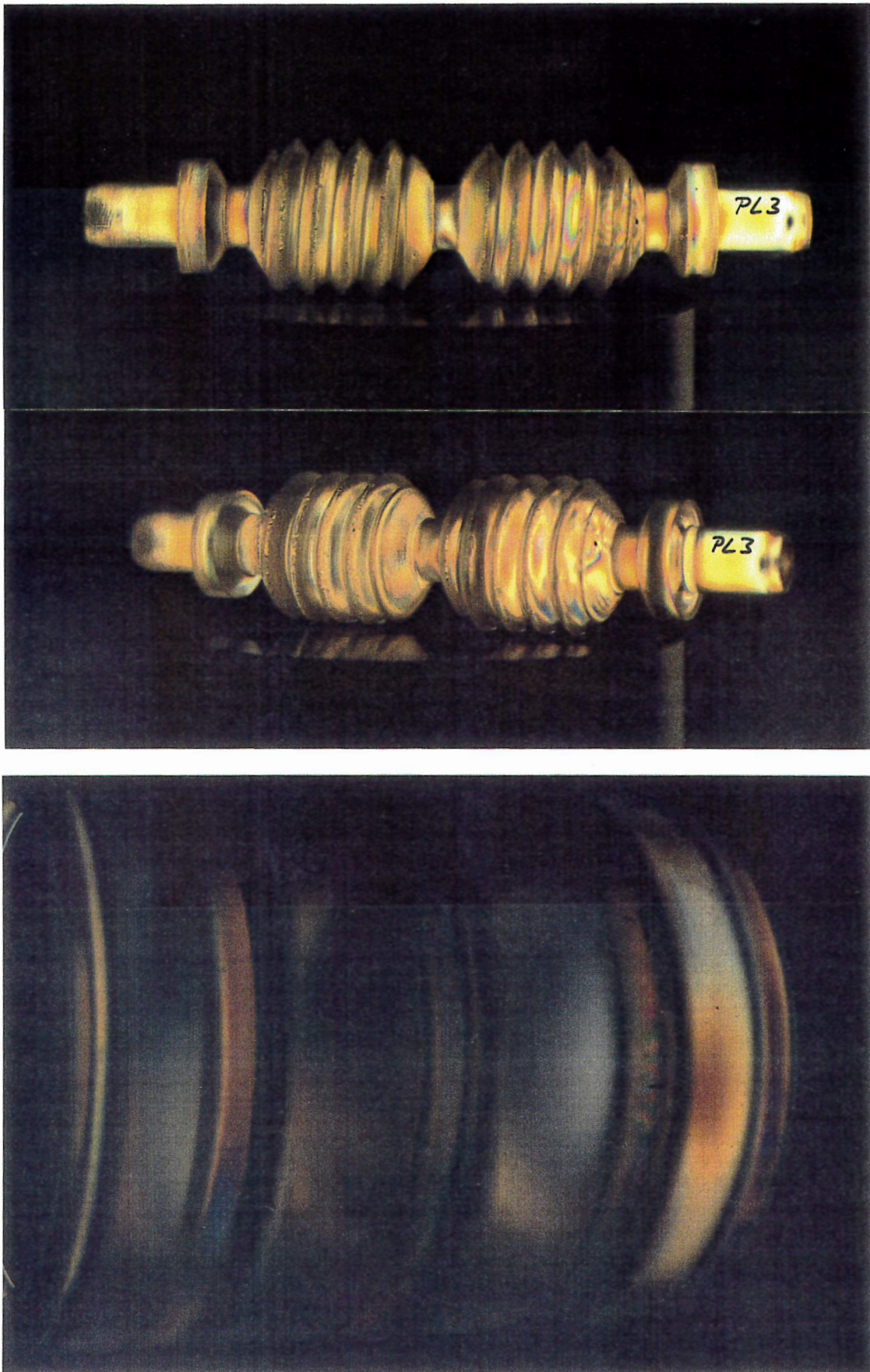


Bild 6.2.2.10.: Isochromaten um die Kontaktpunkte Planet 3 - Mutter

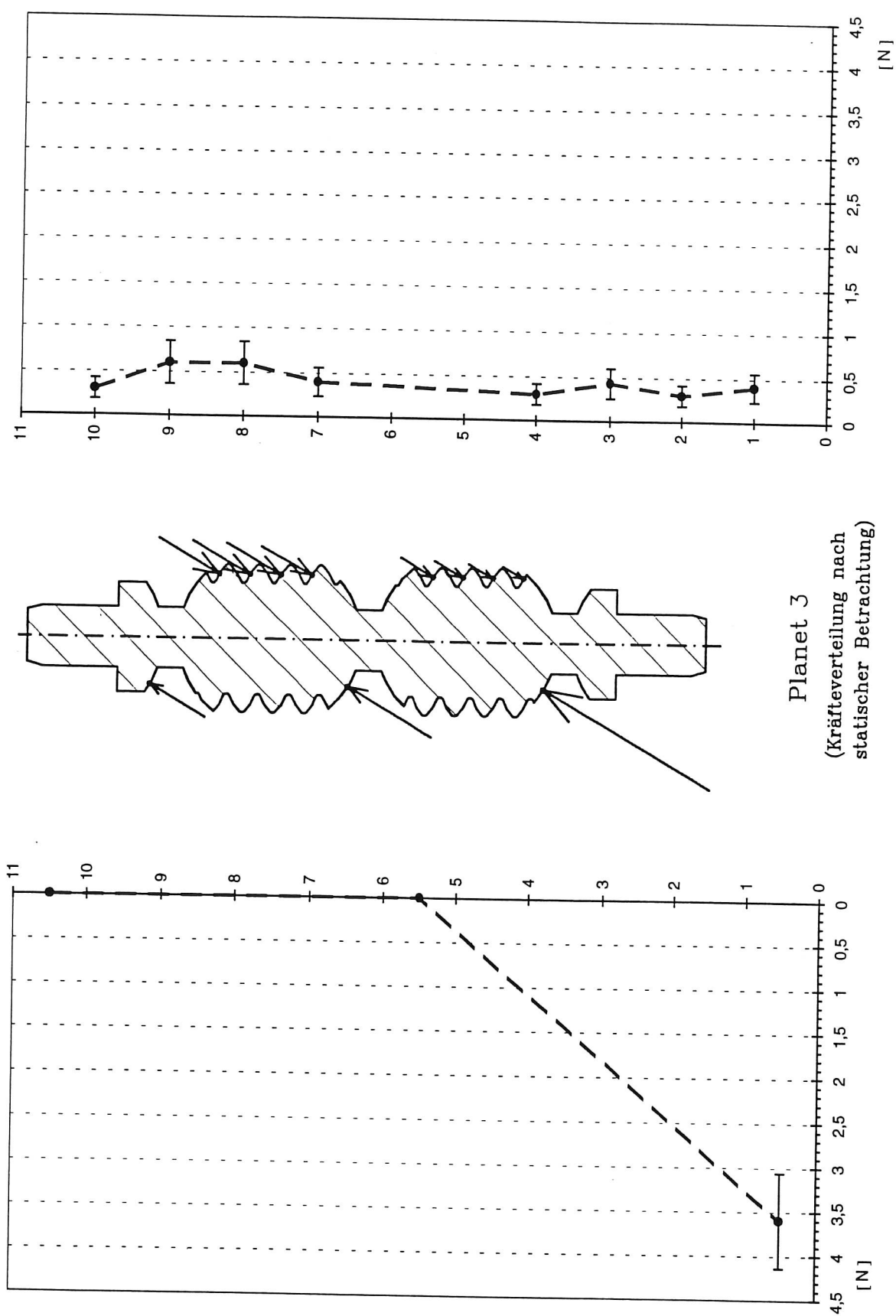


Bild 6.2.2.11.: Kräfteverteilung auf die spindel- und mutterseitigen Kontaktpunkte am Planet 3

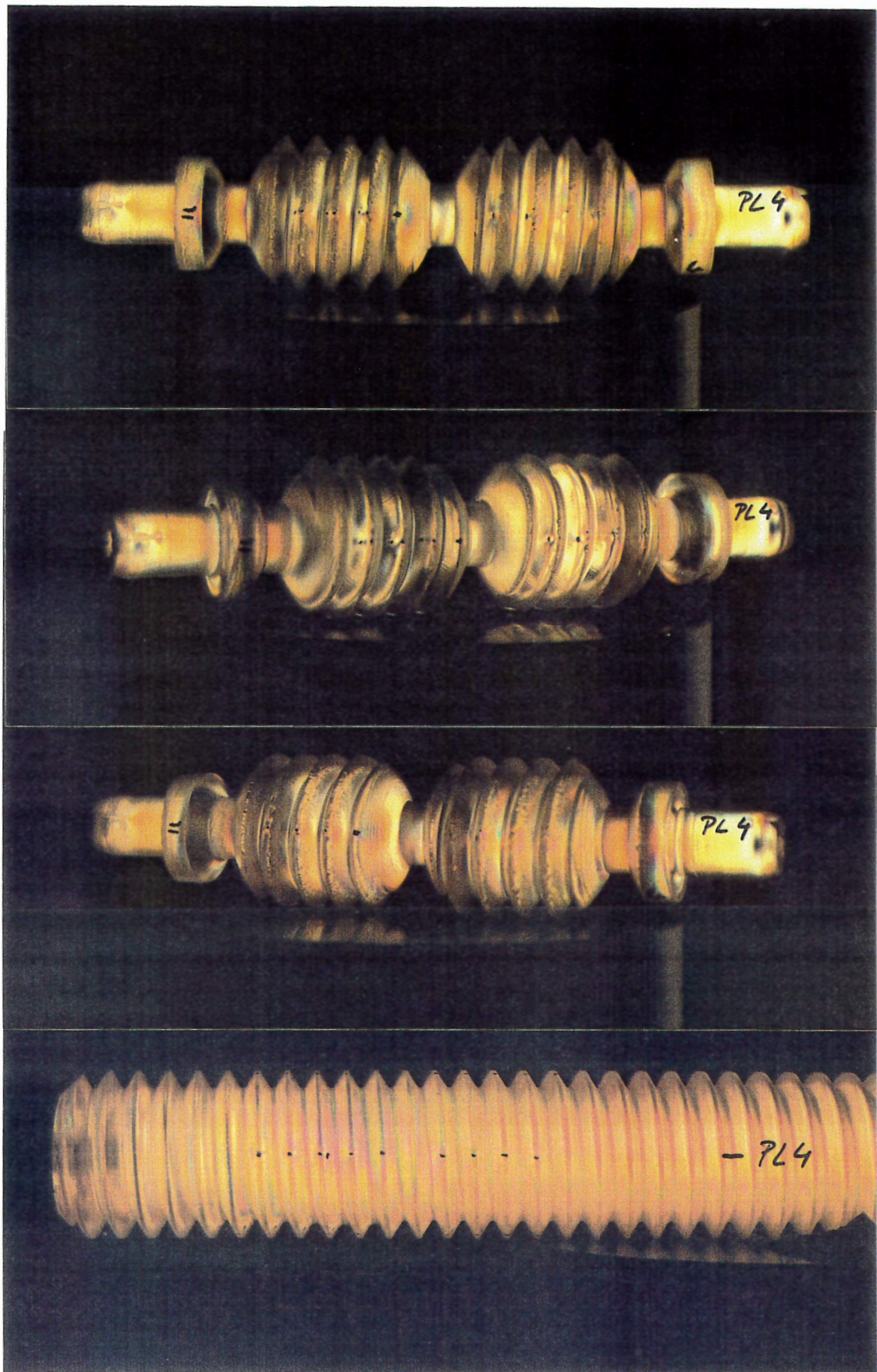


Bild 6.2.2.12.: Isochromaten um die Kontaktpunkte Spindelstange - Planet 4

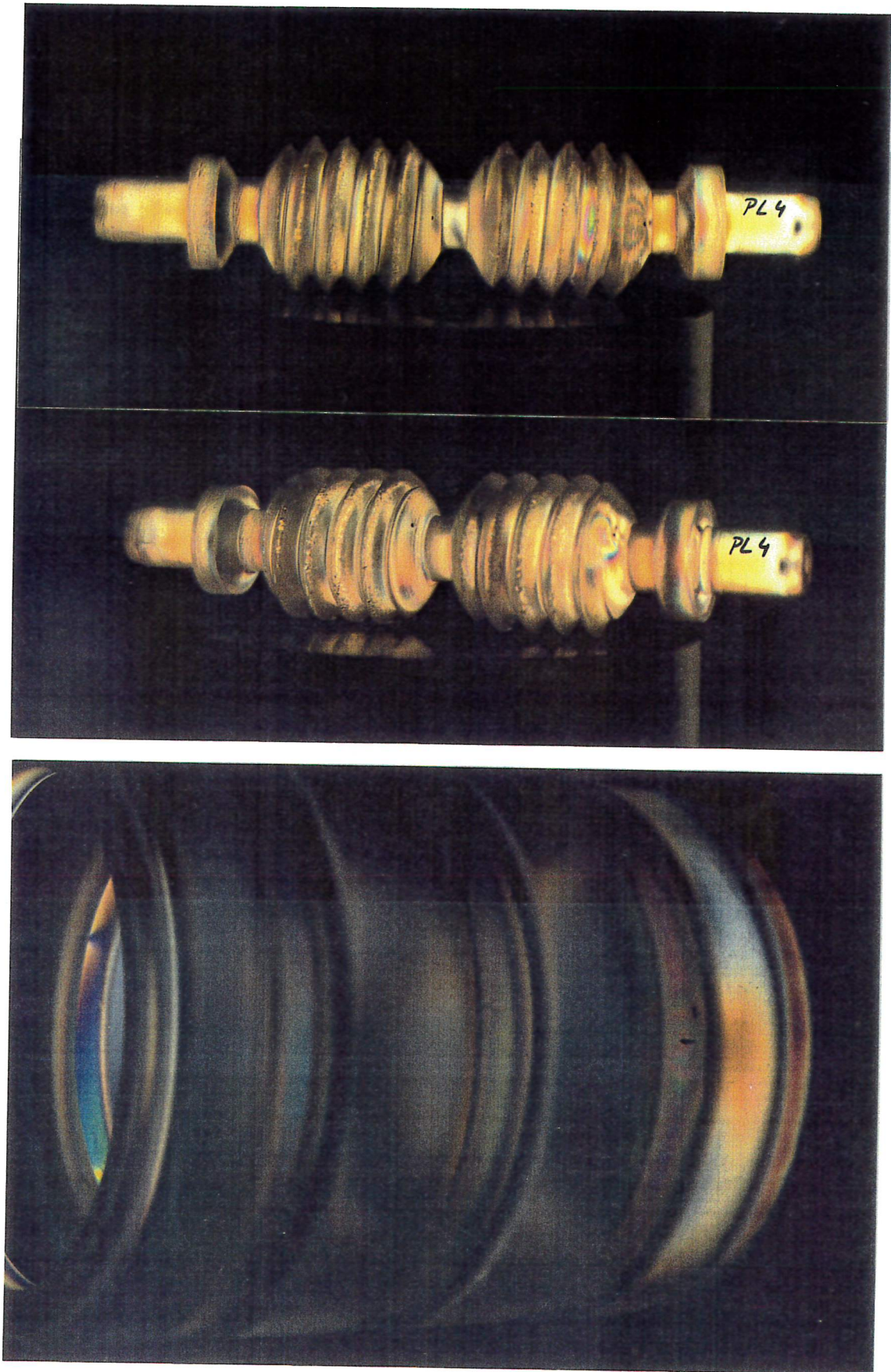


Bild 6.2.2.13.: Isochromaten um die Kontaktpunkte Planet 4 - Mutter

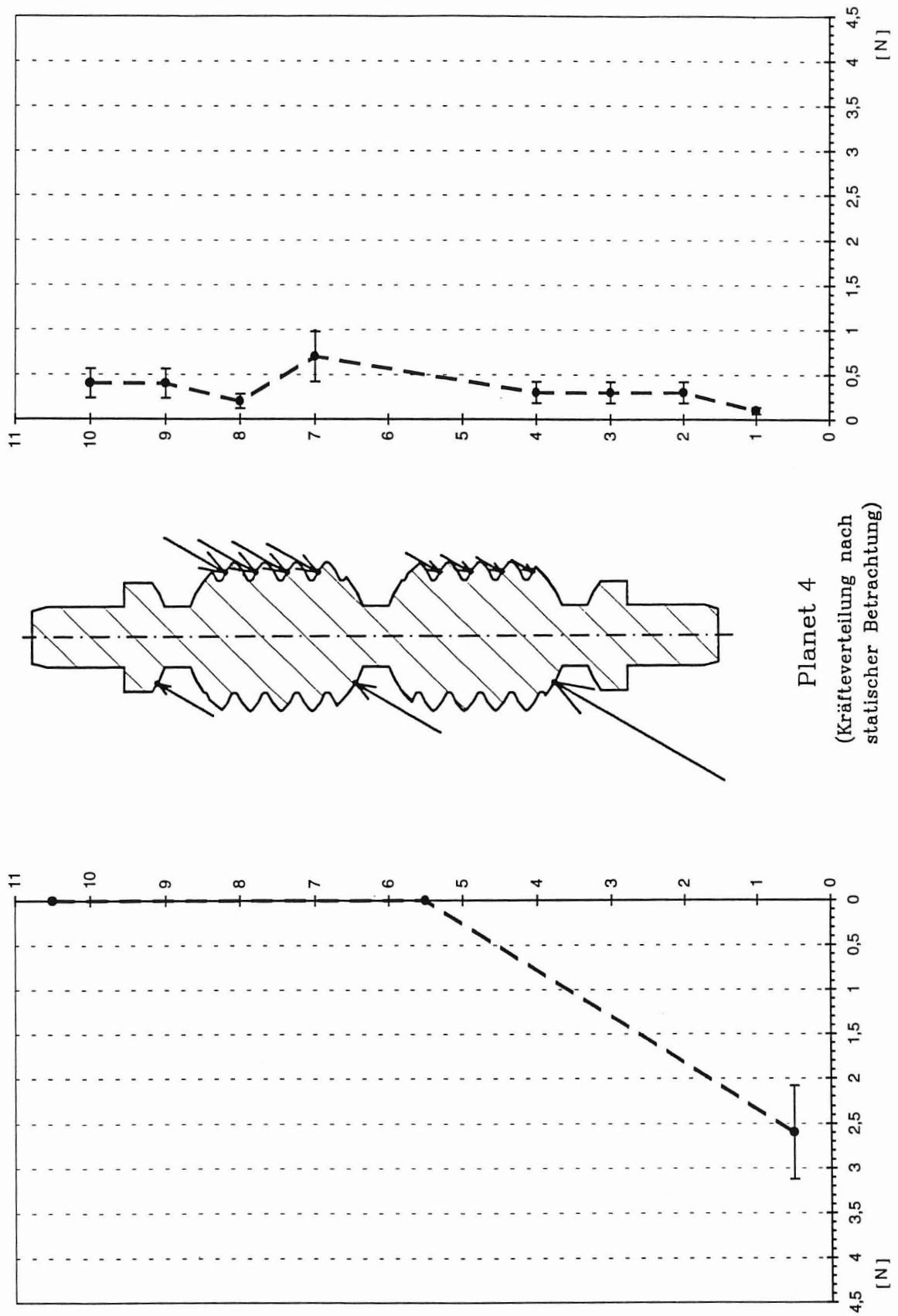


Bild 6.2.2.14.: Kräfteverteilung auf die spindel- und mutterseitigen Kontaktpunkte am Planet 4

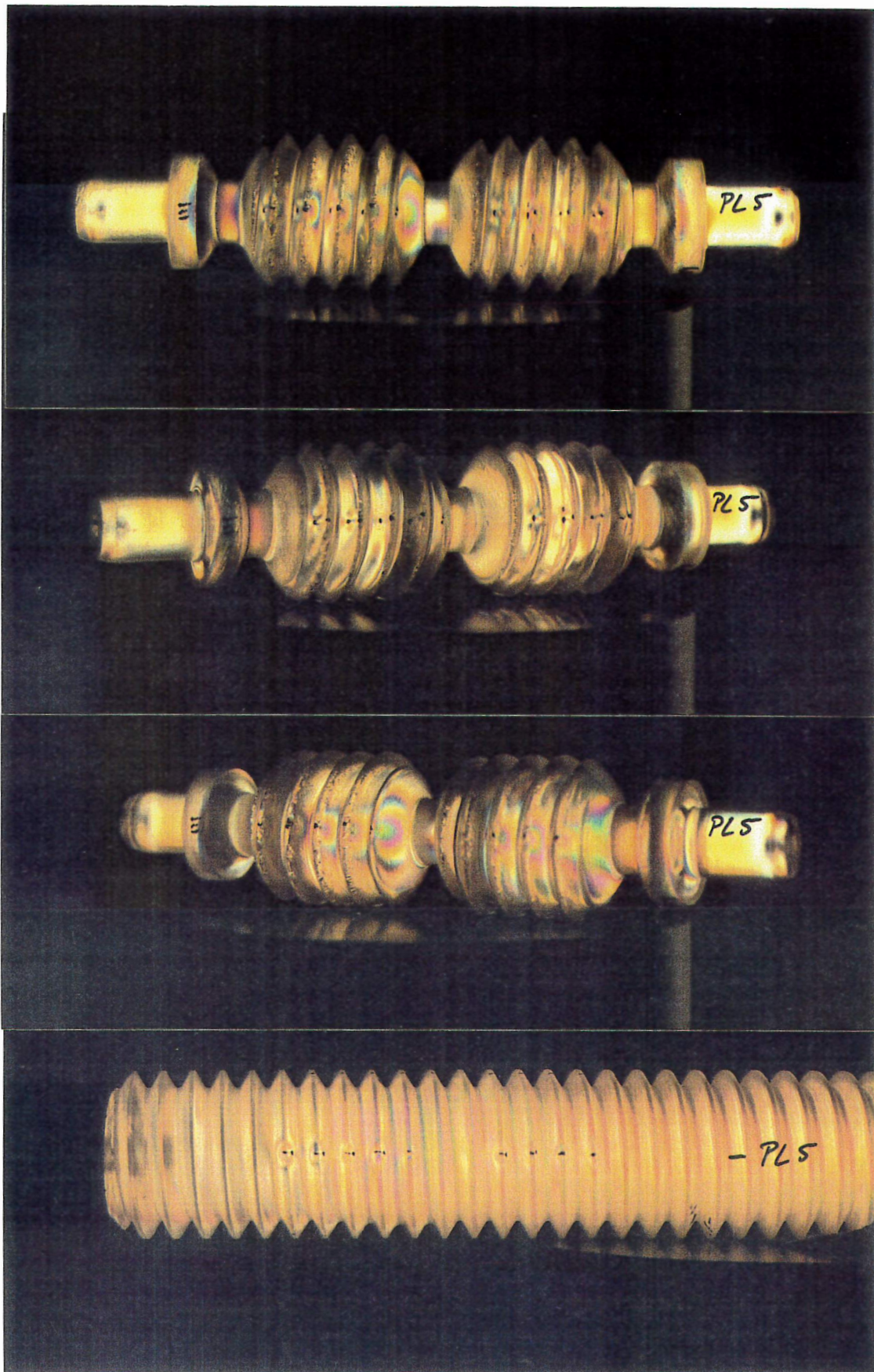


Bild 6.2.2.15.: Isochromaten um die Kontaktpunkte Spindelstange - Planet 5

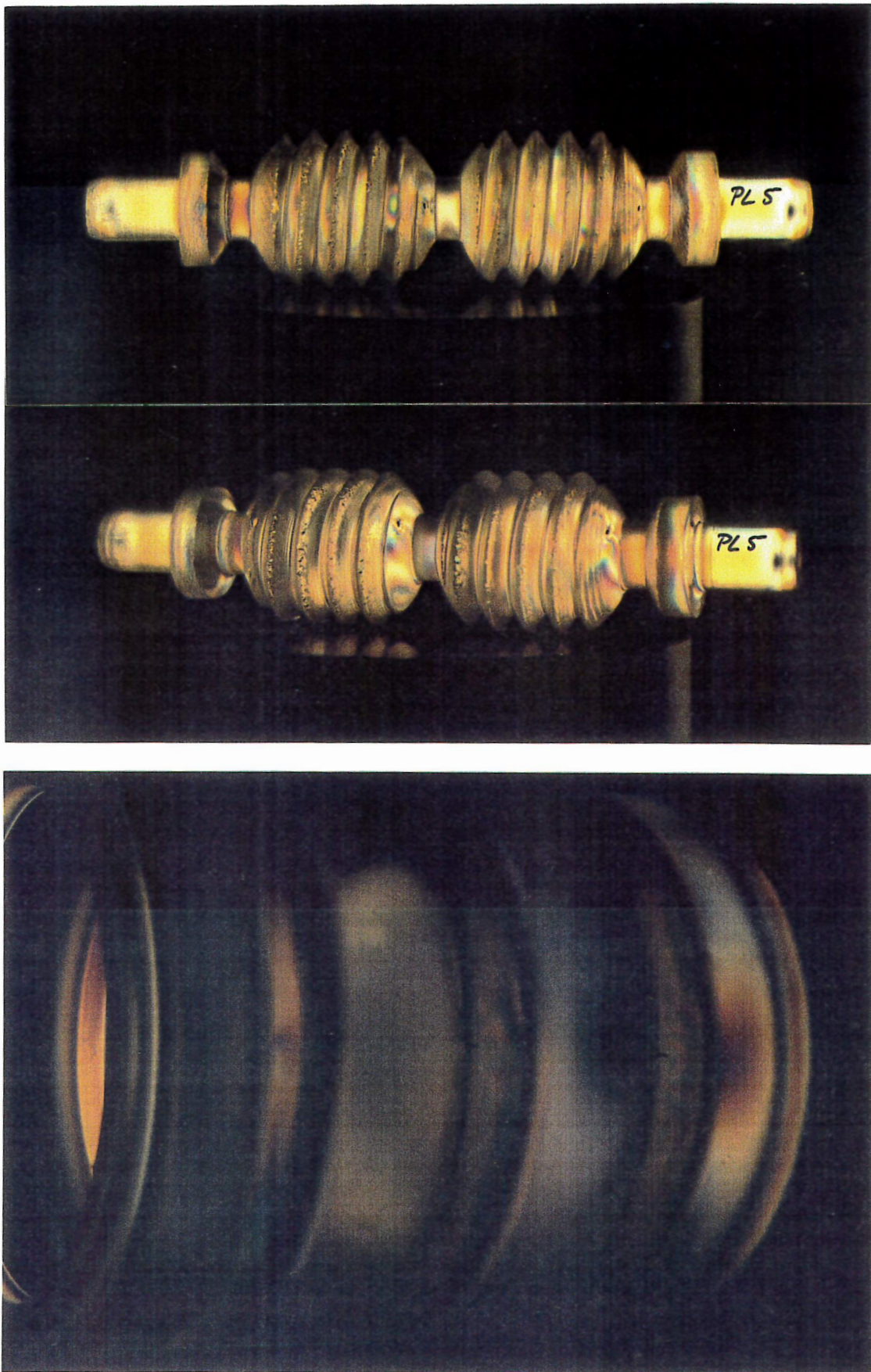


Bild 6.2.2.16.: Isochromaten um die Kontaktpunkte Planet 5 - Mutter

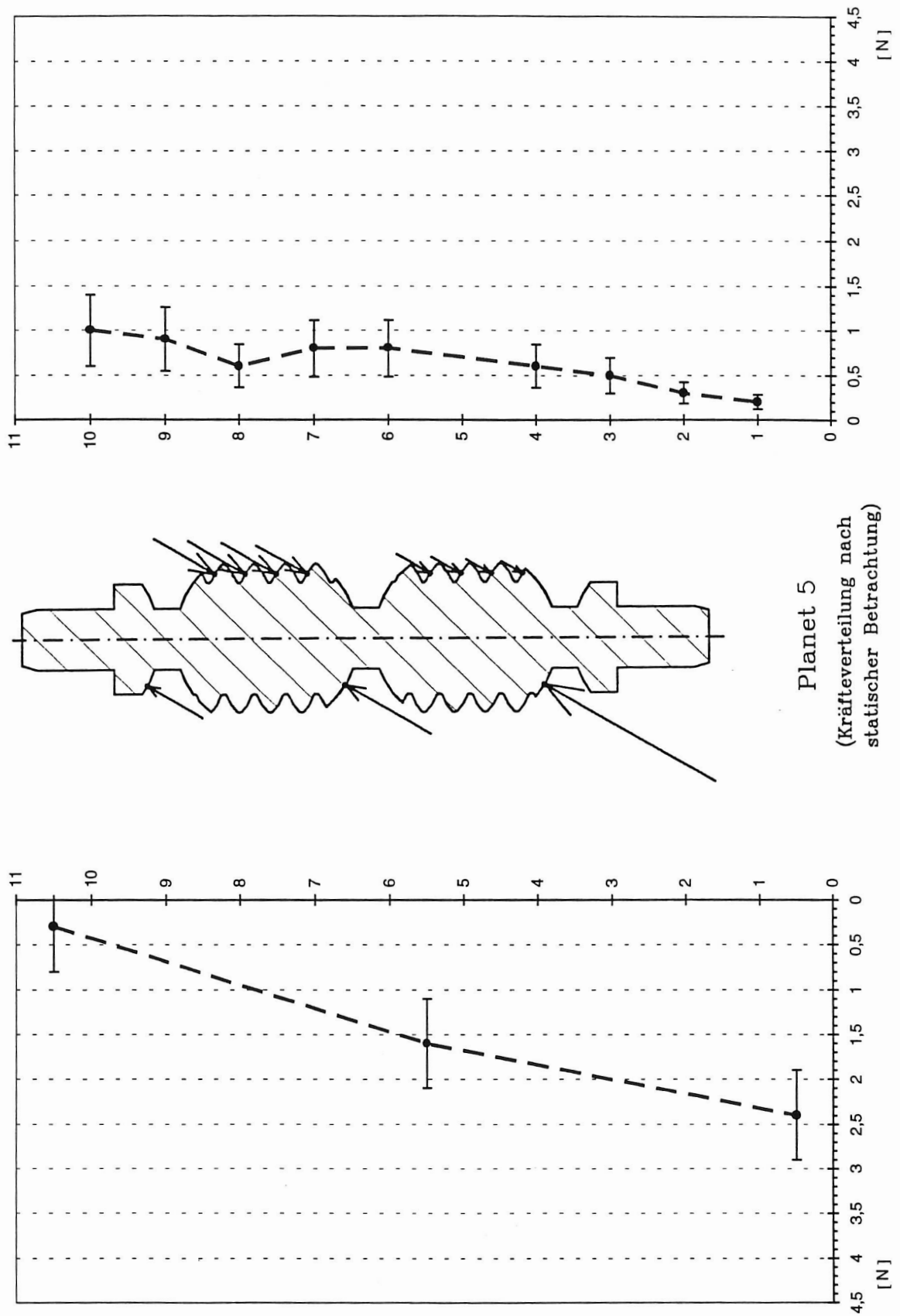


Bild 6.2.2.17.: Kräfteverteilung auf die spindel- und mutterseitigen Kontaktpunkte am Planet 5

→ (Bild 6.2.2.18.) Zusammenfassend sind die Mittelwerte und Maximalwerte der Kontaktkräfte aufgetragen. Um die Inhomogenität der Kräfteverteilung zu verdeutlichen, ist zusätzlich der Kraftwert für gleichmäßige Verteilung auf alle Kontaktpunkte markiert.

⇒ Die Fertigungstoleranzen im Zusammenspiel mit den, durch die Konstruktion bedingten, Freiheitsgraden der Planeten haben dazu geführt, daß nicht alle Kontakte gleichermaßen zum Einsatz kommen. Nachgiebigkeiten im Bereich der Kontaktpunkte können ausgleichend wirken. Da die Gewindeflanken von Spindelstange und Planeten nachgiebiger sind als die Ringnuten in den Planeten und die Mutterstege, ergibt sich dort ein höherer Traganteil.

Von den 40 möglichen Kontakten zwischen Planeten und Spindelstange haben 34 (85%) Kräfte übertragen. Die Inhomogenität der Kräfteverteilung führt zu Spitzenwerten, die das 2,7-fache des Wertes bei gleichmäßiger Verteilung betragen.

Von den 15 möglichen Kontaktpunkten zwischen Planeten und Mutter haben 9 (60%) Kräfte übertragen. Die Spitzenwerte betragen das 3,5-fache des Wertes bei gleichmäßiger Verteilung.

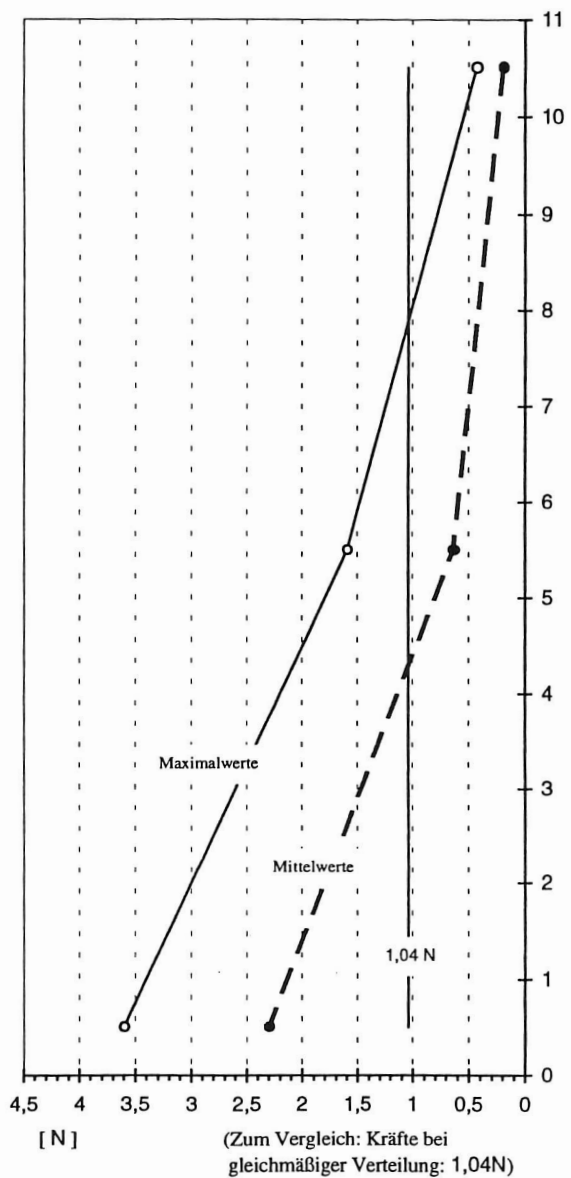
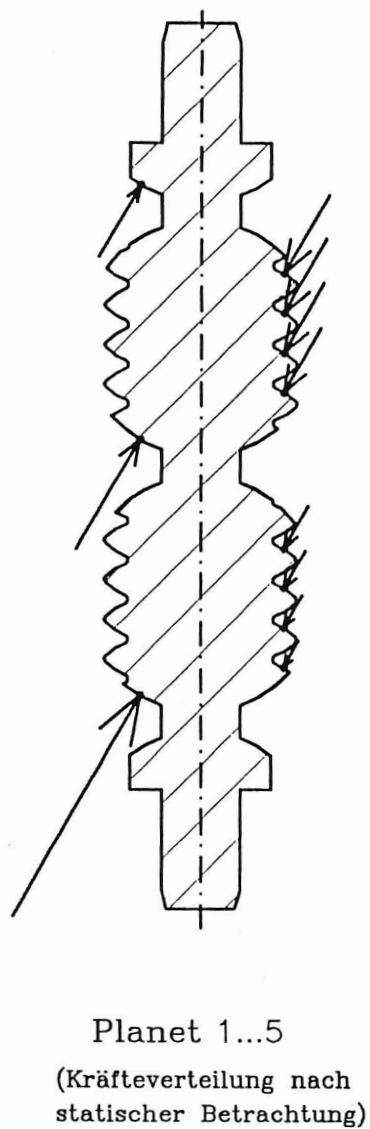
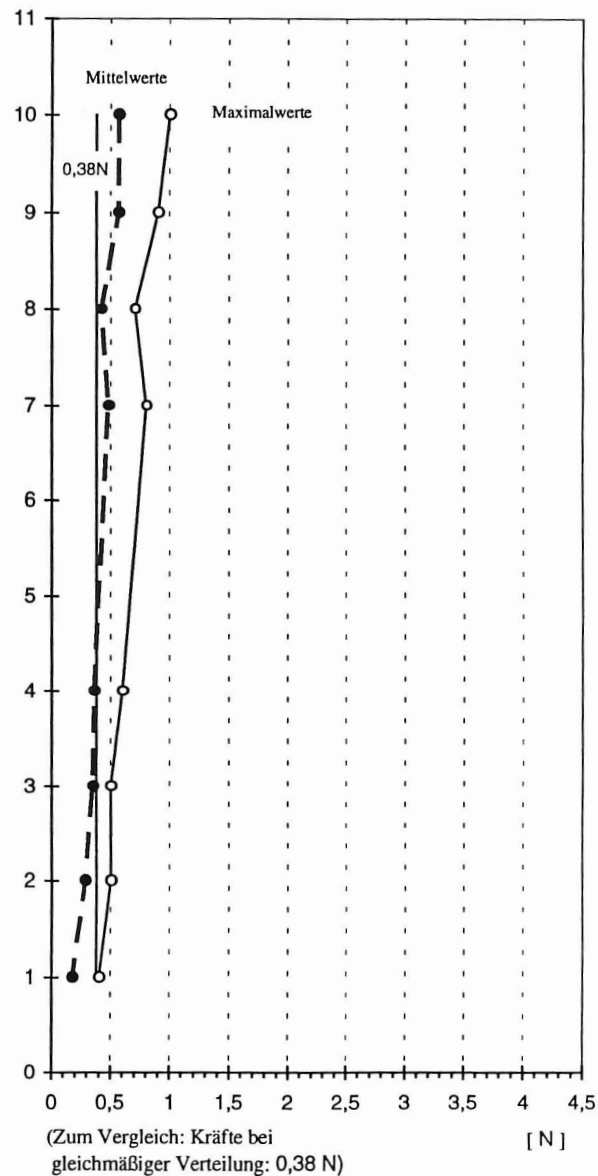


Bild 6.2.2.18: Zusammenfassung der Kräfteverteilung auf die Kontaktpunkte am Planeten

→ (Bild 6.2.2.19.) Die Führungsringe sind mit Bohrungen versehen, um die Planeten über den Umfang auf gleicher Distanz zu halten. Der Lochkreisdurchmesser wäre für eine spielfreie PWG mit exakt gefertigter Spindelstange passend gewesen. Dadurch, daß die Spindelstange zu klein gefertigt wurde, rutschen die Planeten radial nach innen und liegen an den Innenseiten der Führungsbohrungen an. Die Planeten werden somit radial geführt, was zu erhöhter Reibung führt und sich ungünstig auf die Ausbildung der Planetenkontaktpunkte auswirkt.

⇒ Durch Langlöcher, die den Planeten in radialer Richtung mehr Spiel lassen als in tangentialer Richtung, kann man diesen Effekt vermeiden.

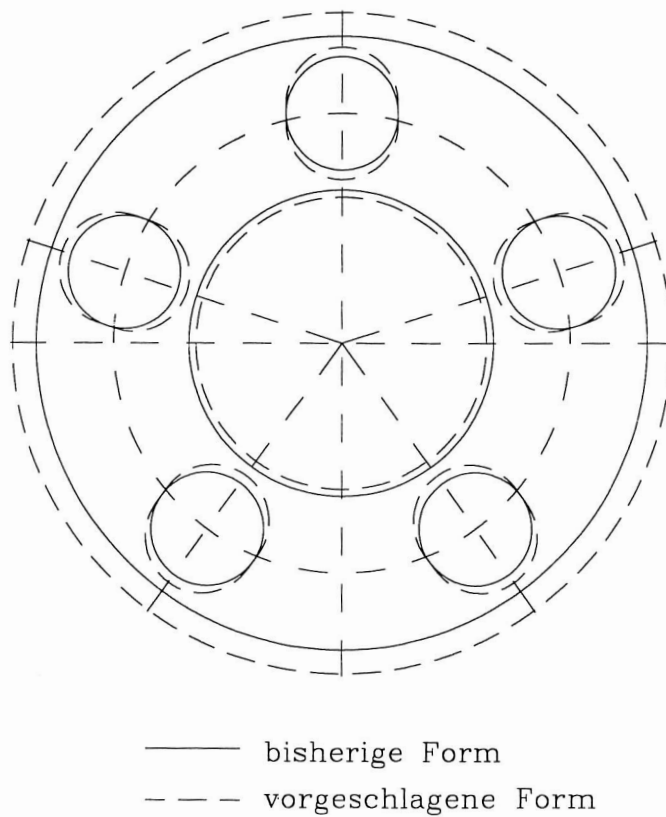


Bild 6.2.2.19.: Führungsringe mit Langlöchern lassen den Planeten mehr Radialspiel



6.3.1. Vor der Belastung im Einfrierversuch

→ Die Mutter weist keine meßbaren Formfehler auf. Die Bauteilgröße gewährt ausreichende Stabilität gegen elastische Verformungen durch die Schnittkräfte während der Bearbeitung.

→ (Bild 6.3.1.1.) Die konkaven Flanken der Mutterstege lassen sich durch einen Abdruck und ein daraus erstellten Schnitt an die Planetenkontur anlegen. Bedingt durch die Nachgiebigkeit der Abformmasse ließen sich nur grobe Formfehler nachweisen.

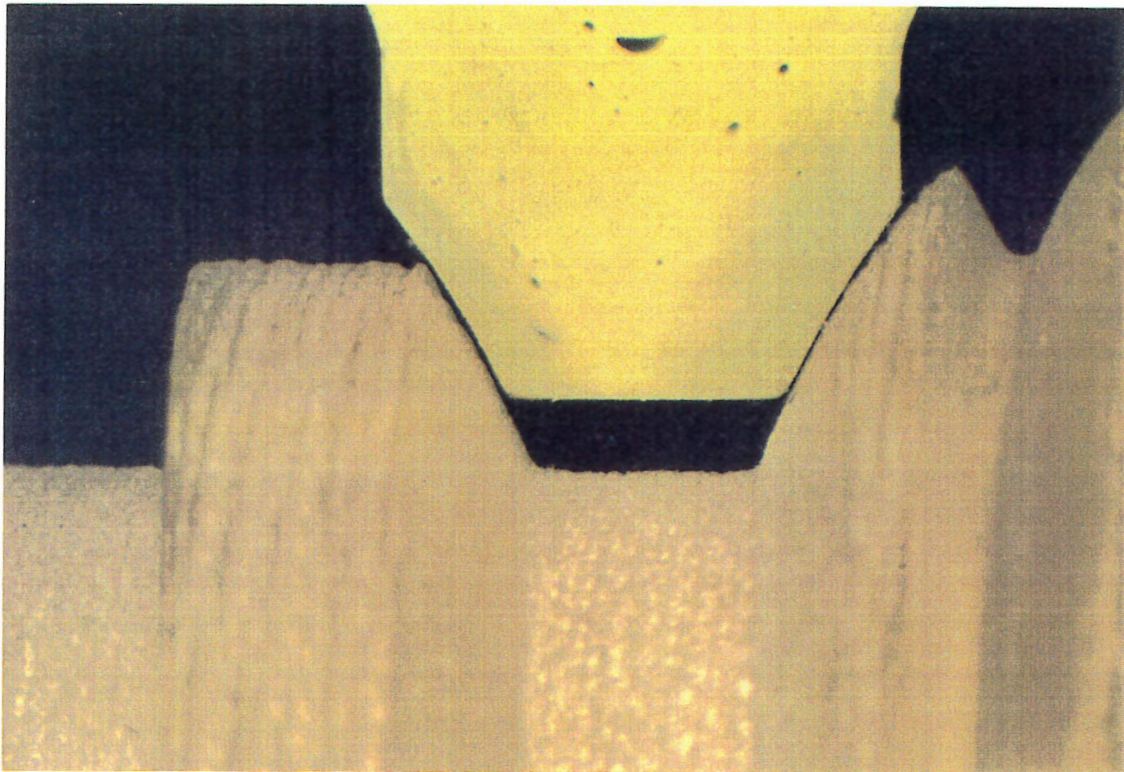


Bild 6.3.1.: Innenkontur der Mutter als Abdruck im Vergleich zur Planetenkontur

⇒ Die Kontaktgeometrien der Mutter-Planet-Kontakte sind, mit Rücksicht auf die Hertz'sche Pressung, als konvexe Ringnuten planetenseitig und konkave Stege mutterseitig ausgeführt. Diese Geometrie ist empfindlich gegenüber großen Fertigungstoleranzen und Fehlstellungen der Planeten. Weniger Anfällig ist die Kontaktgeometrie, wenn nur eine Seite konvex und die gegenüberliegende Seite mit geraden Flanken ausgeführt ist. Führt man die Mutter zweiteilig mit geraden Flanken aus, kann man über eine Verschraubung oder Paßscheiben eine Vorspannung der PWG erzeugen, die Fehlstellungen der Planeten verringert und den Schlupf aus Gleitreibung verhindert.

6.3.2. Nach der Belastung im Einfrierversuch

→ (Bild 6.3.2.1.) Die Mutter wurde durch die Kontaktkräfte zu den Planeten, die sich in radiale (x-Richtung) und axiale (z-Richtung) Komponenten aufspalten lassen, verformt. In den Schnittebenen 0h-6h (Schnittebene mit Planet 2 im Eingriff) und 4h-10h (entspricht etwa Schnittebene mit Planet 5 und 3 im Eingriff) ist eine Aufweitung des im Versuch unteren Teil der Mutter von max. 0,1mm (0,1%) zu messen. Gleichzeitig zeigen die Messungen des Innendurchmessers eine Verengung (0,05mm, 0,07%) im oberen Teil der Mutter (Meßstelle e).

Die Aufweitung hat aufgrund der unterschiedlich hohen Lasten der Planeten nicht in allen Ebenen stattgefunden. In der Ebene 2h-8h (Schnittebene mit Planet 1) wurde der Mutterdurchmesser vermindert, weil der Planet 1 annähernd keine Lasten übertragen hat.

Zusammenfassend kann man feststellen, daß die zuvor gerade zylindrische Mutter zu einem elliptischen Kegelstumpf verformt wurde.

		0h (\cong PI2)		2h (\cong PI1)		4h (\cong PI5)		6h		8h		10h (\cong PI3)	
		v	n	v	n	v	n	v	n	v	n	v	n
Außen-Ø: [mm] (Mikrometer- schraube)	a	90,09	90,19	90,10	90,02	90,09	90,14	= 0h		= 2h		= 4h	
	b	90,08	90,18	90,08	90,09	90,08	90,18						
	c	90,08	90,16	90,08	89,98	90,08	90,11						
	d	90,08	90,10	90,08	89,99	90,08	90,10						
	e	90,07	90,08	90,07	90,01	90,07	90,10						
Innen-Ø: [mm] (Mikrometer- schraube)	a	73,067	73,102	73,068	73,065	= 0h		= 2h		= 0h		= 2h	
	b	61,110	61,145	61,112	61,105								
	c	61,430	61,455	61,435	61,422								
	d	61,480	61,490	61,465	61,477								
	e	73,112	73,062	73,107	73,055								

Bild 6.3.2.1.: Auszug aus dem Meßprotokoll der Mutter

→ (Bild 6.3.2.2.) Die axialen Anteile der Kontaktkräfte haben eine Verminderung (max. 0,07mm, 0,4%) des Abstandmeßwertes k hervorgerufen. D.h. die Mutter wird zwischen dem untersten Steg, auf den die größten Kontaktkräfte wirken (siehe Kapitel 6.2.2.) und der Stirnseite, die der Auflagefläche der PWG entspricht, gestaucht.

Die Stege wurden ähnlich Tellerfedern nach unten gekippt, so daß die Breite der Stege (Meßstellen l,n und p) vergrößert erscheint.

		0h (\cong Pl2)		2h (\cong Pl1)		4h (\cong Pl5)		6h		8h		10h (\cong Pl3)	
		v	n	v	n	v	n	v	n	v	n	v	n
Abstände:	k	20,09	20,02	20,10	20,05	20,09	20,02	20,09	20,04	20,09	20,03	20,09	20,02
[mm]	l	9,93	9,95	9,91	9,95	9,92	9,96	9,91	9,95	9,91	9,95	9,91	9,95
(Mikrometer-	m	22,57	22,56	22,57	22,56	22,56	22,55	22,57	22,58	22,56	22,60	22,57	22,62
schraube,	n	9,90	9,96	9,91	9,95	9,91	9,96	9,91	9,94	9,91	9,95	9,90	9,95
Meß-	o	22,56	22,56	22,56	22,56	22,56	22,56	22,57	22,55	22,57	22,58	22,57	22,57
schieber)	p	9,91	9,96	9,90	9,96	9,90	9,96	9,90	9,96	9,90	9,96	9,91	9,95
	q	20,08	20,09	20,08	20,07	20,08	20,07	20,08	20,08	20,08	20,07	20,08	20,08

Bild 6.3.2.2.: Auszug aus dem Meßprotokoll der Mutter

⇒ (Bild 6.3.2.3.) Die Verformungen der Mutter hängen nicht nur von der Steifigkeit der Mutter ab, sondern werden stark von der Steifigkeit der Einbausituation bestimmt. Im Einfrierversuch stand die Mutter frei auf dem Zentrierflansch, so daß sie sich ungehindert verformen konnte. Die Verformungen sind in folgender Darstellung verstärkt dargestellt, wobei nur ein Planet mit mittleren Lastwerten berücksichtigt wurde.

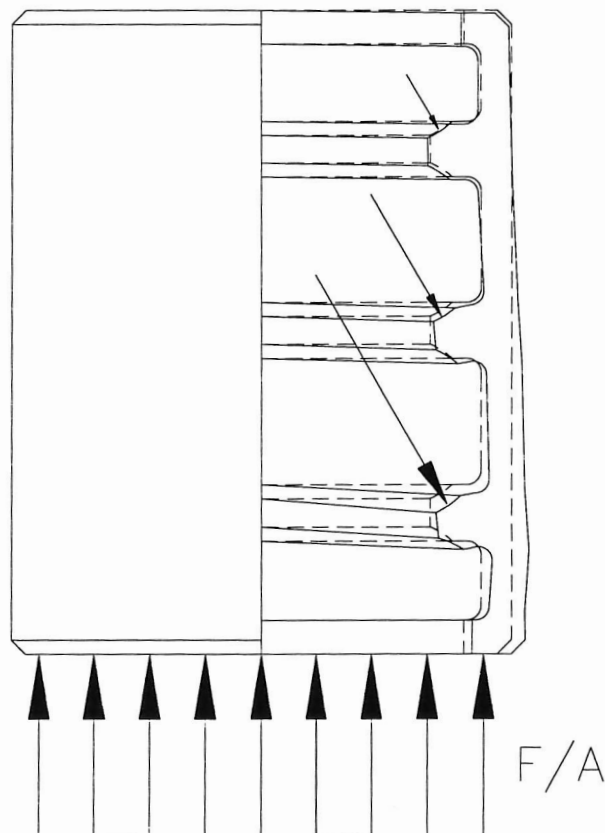


Bild 6.3.2.3.: Verformung der Mutter in überhöhter Darstellung

7. Fazit und Ausblick

Die Belastung der PWG im spannungsoptischen Einfrierversuch stellt den idealisierten statischen Lastfall dar. Die Auswertungen lassen auf den Spannungs- und Verformungszustand ohne äußere Einflüsse schließen. Äußere Einflüsse sind: schiefe Kraft- bzw. Momenteneinleitung, zusätzliche Kräfte aus statisch überzähligen Lagerreaktionen, zusätzliche Kräfte an den Fügestellen der Anbauten und Wärmeeinflüsse aus Verlustleistungen.

Die Ergebnisse der spannungsoptischen Untersuchung und der Verformungsmessung zeigen, daß die größten Spannungen bzw. Verformungen im Bereich der Kontakte auftreten.

Kräfte und Momente werden über Form- und Reibschluß zwischen den Bauteilen Spindelstange, Planeten und Mutter übertragen. Die für den Reibschluß notwendige Haftreibung zwischen den Bauteilen ist von der Geometrie der Kontakte und den sich daraus ergebenden Kontaktkräften abhängig.

Bei der Auslegung der PWG, bzgl. Festigkeit und Funktion, handelt es sich folglich um ein Kontaktproblem.

Zur Betrachtung der Kontaktgeometrie und Kontaktkräfte ist es Voraussetzung, daß sich die Bauteile in den gewünschten Kontaktpunkten berühren. Fertigungstoleranzen, statisch überzählige Zwischenreaktionen und Freiheitsgrade der Bauteile, sowie die Lagerung der PWG sind ausschlaggebend für die Anzahl der am Kraftfluß beteiligten Kontakte. Ein Ausgleich kann durch Nachgiebigkeit im Bereich der Kontaktpunkte herbeigeführt werden. Globale Verformungen, wie die Durchbiegung der Spindelstange, beeinflussen gleichermaßen die Anzahl und Art der Kontakte. Bei der untersuchten PWG waren die globalen Verformungen kleiner als die Formabweichungen aus Fertigungsungenauigkeiten und somit von untergeordneter Bedeutung.

Dieses Prinzip zeigt sich in den Kontakten zwischen Spindelstange und Planeten mit nachgiebigen Gewindeflanken durch einen hohen Traganteil von 85%, gegenüber der steifen Kontaktgeometrie zwischen Planeten und Mutter mit einem Traganteil von nur 60%. Je geringer die Anzahl der Kontakte, um so größer ist folglich die Belastung pro Kontakt. Zudem ist die Inhomogenität der Kräfteverteilung auf die Kontakte bei der steifen Anordnung mit geringen Traganteil stärker ausgeprägt und führt zu extremer Überhöhung einzelner Kontaktkräfte.

Das Erscheinungsbild bei Versagen der PWG wird Pittingbildung aufgrund zu hoher Flächenpressung sein. Man könnte annehmen, daß bei Versagen einzelner Kontaktflächen die restlichen, zunächst unbelasteten Kontaktflächen, deren Funktion übernehmen können. Tatsächlich werden aber die herausgebrochenen Pittings, wie „Sand im Getriebe“, die PWG in kürzester Zeit zum Totalausfall bringen.

Da die Verformungen der Bauteile im Einfrierversuch sehr klein waren, bedurfte es aufwendiger Meß- und Auswerteverfahren. Der spannungsoptische Effekt ist nicht stark genug ausgefallen, um in Schnitten eine Isochromatenauswertung vornehmen zu können. Die im PWG-Modell eingefrorenen Spannungen und Verformungen können durch eine, dem Einfrierversuch ähnliche, Wärmebehandlung, dem sogenannten Tempern, bis auf zu vernachlässigende Werte aus Hysterese, entfernt werden.

Ein zweiter Einfrierversuch mit überhöhter Last und größeren Dehnungen ($\epsilon' > \epsilon$) kann genaueren Aufschluß über die globalen Verformungen geben. Das Kontaktproblem verhält sich extrem nichtlinear zur Belastung und wird nur mit Vorsicht interpretierbar sein.

Gleichzeitig mit der spannungsoptischen Untersuchung der PWG wird eine FEM-Analyse durchgeführt werden. Die Erarbeitung des FE-Modells beginnt bei einfachen Körpern, an denen die Parallelen zur Spannungsoptik genutzt werden können.

Als Beispiel soll der für die Kalibrierung der spannungsoptischen Apparatur verwendete Biegebalken dienen (siehe Kap. 5.1.).

Bild 7.1. zeigt den Biegebalken als ebenes FE-Modell. Eine dreidimensionale Diskretisierung des Biegebalkens erhöht den Rechenaufwand auf ein Vielfaches und ist in dem Fall, daß alle Kräfte in einer Ebene liegen, nicht sinnvoll. Entsprechend dem Versuchsaufbau sind zwei Lagerungen in den inneren Bohrungen und die Belastung in den äußeren Bohrungen modelliert. Die Lasteinleitungs- und Lagerstellen sind auf einzelne Knotenpunkte reduziert. Der Kontakt zwischen den Zylinderstiften und den Bohrungen konnte noch nicht modelliert werden.

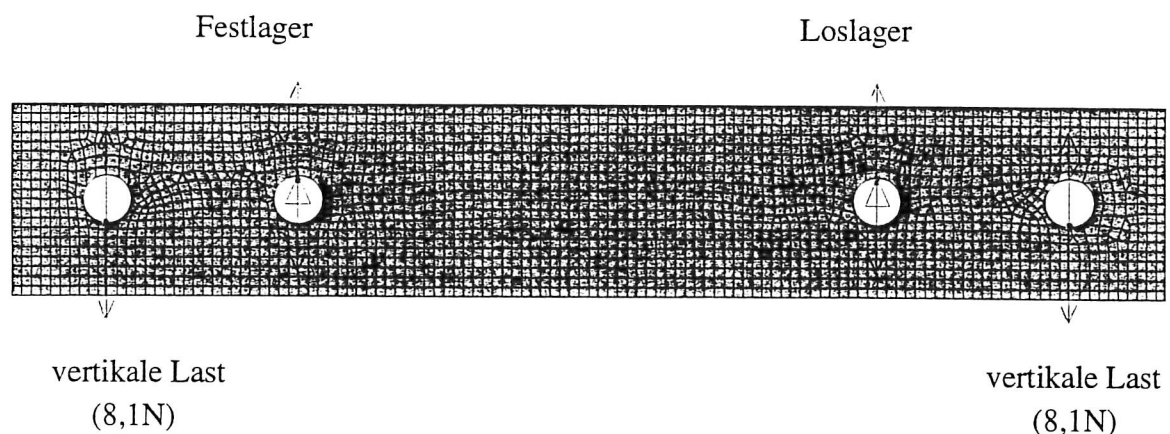


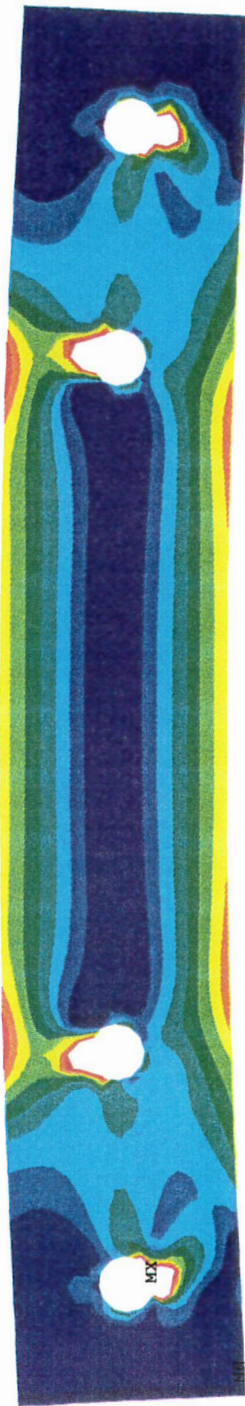
Bild 7.1.: Biegebalken als FE-Modell

Die Vergleichsspannung nach Mises entspricht der Isochromatenbedingung, wenn die Schubspannung verschwindend gering ist. Zum Vergleich sind deshalb Vergleichsspannung und Schubspannungsverteilung abgebildet (Bild 7.2.). Die Farbabstufungen sind in Intervallen von $0,31 \text{ N/mm}^2$, entsprechend der Spannung für eine Isochromatenordnung, gewählt.

Die Isochromatenaufnahme (Bild 7.3.) des Biegebalkens läßt Parallelen zum FE-Modell erkennen. Die Schubspannungen sind sehr gering und beeinflussen die Vergleichbarkeit nur wenig. Deutliche Unterschiede sind jedoch im Bereich der Krafteinleitung und Auflager zu erkennen, hervorgerufen durch die stark vereinfachte Krafteinleitung in Knotenpunkte des FE-Modells. Schon bei diesem einfachen FE-Modell wurde die Erfahrung gemacht, daß die Krafteinleitung über Kontakte zweier Körper äußerst aufwendig zu modellieren ist. Das Kontaktproblem der PWG wird deshalb als selbständiges Problem, abgespalten vom Problem der globalen Verformungen zu behandeln sein.

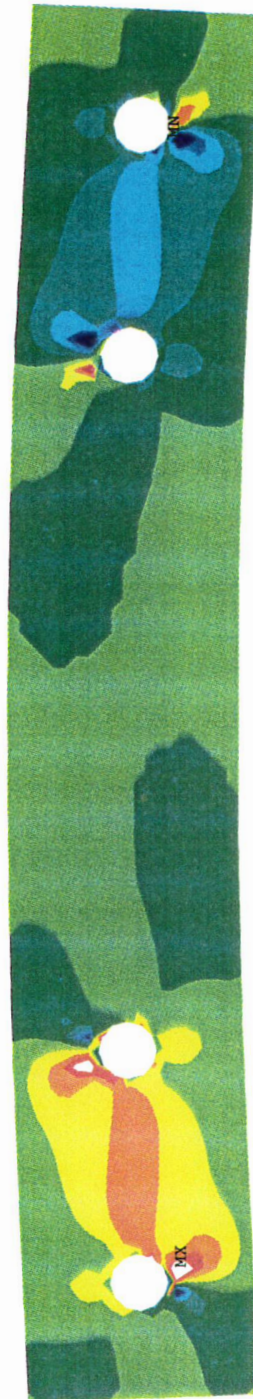
Die Isochromatenaufnahme des Biegebalkens aus Araldit-B zeigt an den Rändern Verzerrungen, den sogenannten „Randeffekt“. Diese Erscheinung entsteht durch Wasseraufnahme des Araldit-B in der Randschicht, die eine Volumenzunahme und somit Druckspannungen in den Randzonen bewirkt (siehe Kap. 4.3.).

0
0.062
0.093
0.124
0.155
0.186
0.217
0.248
0.279
0.31



σ_v

-0.237
-0.124
-0.093
-0.062
-0.031
0
0.031
0.062
0.093
0.124



τ_{xy}

Bild 7.2.: Vergleichsspannung (nach Mises) und Schubspannung aus der Berechnung des FE-Modells

Vergleichsspannung nach Mises:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

spannungsoptische Grundgleichung:

$$\delta = f_\sigma \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot d$$

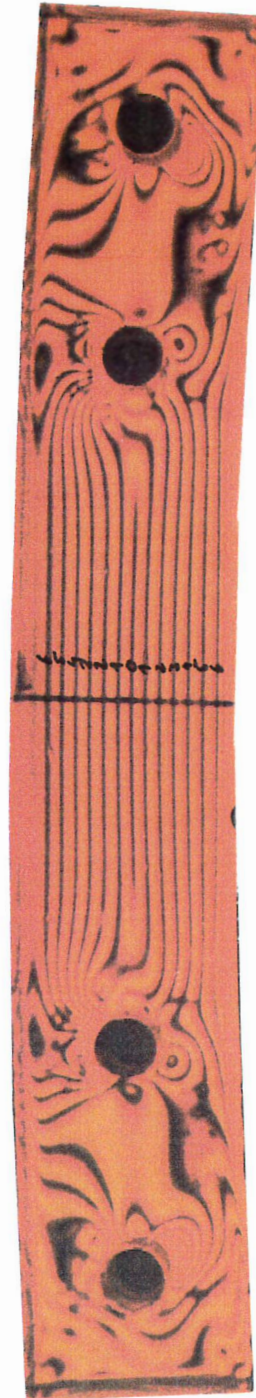


Bild 7.3.: Isochromatenaufnahme des Biegebalkens nach Belastung im Einfrierversuch

Die dynamische Belastung der PWG wurde im Kapitel 4.2. mit einem Anteil von unter 1% als vernachlässigbar angegeben.

Die PWG mit hohem Übersetzungsverhältnis eignet sich besonders gut für die Kombination mit schnellaufenden kompakten Elektromotoren. Gelingt es, Motoren mit 30000 bis 40000 $U_{\text{mdr}}/\text{min}$ und ausreichender Dynamik laufen zu lassen, liegen die dynamischen Lasten in der PWG schon bei bis zu 50%.

Der dynamische Lastfall kann mit der MKS-Simulationssoftware SIMPACK untersucht werden, zusätzlich besteht die Möglichkeit Regelungskonzepte für den jeweiligen Einsatz zu entwickeln.

Erste Schritte auf dem Weg zur Symbiose von Konstruktion, FEM inklusive Spannungsoptik und MKS-Simulation wurden bei der Entwicklung des „künstlichen Muskels“ bereits gemacht.

Die Konstruktionsdaten wurden mit dem CAD-System Pro/ENGINEER erstellt, die FEM-Berechnung der zur Kraftmessung verwendeten Membran wurde in ANSYS durchgeführt und die bewegte Simulation der Mechanik des künstlichen Muskels mit einem angepaßten Regelungskonzept konnten in SIMPACK dargestellt werden.

Dieses Konzept wurde bei der Institutsvorstellung vorgeführt und anhand eines Plakates erläutert (siehe Anhang E.).

8. Literaturverzeichnis

- [1] M. Balázs, B. Gombert, G. Hirzinger, B. Willberg:
Planeten-Wälz-Gewindespindel, Sonderdruck aus der Zeitschrift: *F&M
Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Meßtechnik*
Heft 5/95, 103. Jahrgang, Carl Hanser Verlag München, Wien

- [2] Fa. ESPE:
Permagum®
Produktinformation, Seefeld, 1995

- [3] L. Föppl, E. Mönch:
Praktische Spannungsoptik
3. Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1972

- [4] Fa. Heraeus Vötsch:
Betriebsanleitung für Temperatur-Tisch-Prüfschrank VMT 04/140
Balingen, 1986

- [5] P. Lorenz, V. Poterasu, N. Mihalache:
Methode der Finiten Elemente und der Randelemente
Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, 1995

- [6] *VDI Richtlinie 2226*
VDI Verlag GmbH Düsseldorf

- [7] C. Rohrbach:
Handbuch für experimentelle Spannungsanalyse
VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1989

- [8] Hoischen:
Technisches Zeichnen
20. Auflage, Verlag W. Girardet Essen, 1984

- [9] M. Klein:
Einführung in die DIN-Normen
8. Auflage, Teubner Verlag Stuttgart, 1980

- [10] G. Niemann:
Maschinenelemente
2. Auflage, Springer Verlag Berlin, 1975

- [11] H. Roloff, W. Matek:
Maschinenelemente
7. Auflage, Vieweg Verlag Braunschweig, 1976

- [12] Autodesk Development B.V.:
AutoCAD Referenzhandbuch Release 12
Neuchatel Schweiz, 1992

- [13] Eschmann, Paul:
Die Wälzlagerpraxis
2. Auflage, Oldenburg Verlag München, Wien, 1978

- [14] SKF:
Rollengewindetriebe
Katalog 3793/1 T, Meckesheim, 1992

- [15] Schnell, Groß, Hauger
Technische Mechanik Band2: Elastostatik
2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1989

- [16] M. Balázs, B. Gombert, G. Hirzinger:
Die DLR-Planeten-Wälz-Gewindespindel
unveröffentlichter Zwischenbericht, Eigendruck, 1994

9. Formelzeichen

a	Hebelarm
a	Abstand Modell/Kamera
A	Lichtvektor
A_1	Komponente des Lichtvektors in Richtung der ersten Hauptspannung
A_2	Komponente des Lichtvektors in Richtung der zweiten Hauptspannung
c	Lichtgeschwindigkeit
C_1	Materialkonstante
C_2	Materialkonstante
d	Materialdicke, Lichtlauflänge durch Modell
d_{Kern}	Kerndurchmesser
D_M	Wälzkreisdurchmesser Mutter
D_M	Durchmesser der Modells
D_{MB}	scheinbarer Durchmesser in der Abbildung
D_{mx}	Rotationsfreiheitsgrad der Mutter um x-Achse
D_{my}	Rotationsfreiheitsgrad der Mutter um y-Achse
D_{PM}	Wälzkreisdurchmesser Planeten mutterseitig
D_{py}	Rotationsfreiheitsgrad des Planeten um die y-Achse
D_{pz}	Rotationsfreiheitsgrad des Planeten um die z-Achse
D_{PS}	Wälzkreisdurchmesser Planeten spindelseitig
D_S	Wälzkreisdurchmesser Spindelstange
D_{sz}	Rotationsfreiheitsgrad des Planeten um die z-Achse der Spindelstange
E	Elastizitätskonstante
F	Kraft
F_{axial}	Kraft in axialer Richtung
F_{mx}	Kraft an der Mutter in x-Richtung
F_{my}	Kraft an der Mutter in y-Richtung
F_{mz}	Kraft an der Mutter in z-Richtung
F_{px}	Kraft am Planeten in x-Richtung
F_{py}	Kraft am Planeten in y-Richtung
F_{pz}	Kraft am Planeten in z-Richtung
F_{sx}	Kraft an der Spindelstange in x-Richtung
F_{sy}	Kraft an der Spindelstange in y-Richtung
F_{sz}	Kraft an der Spindelstange in z-Richtung
f_{σ}	Spannungsoptische Konstante
$f_{\sigma,d2}$	Spannungsoptische Konstante nach Auswertung des Biegebalkens mit $d=2\text{mm}$
$f_{\sigma,d5}$	Spannungsoptische Konstante nach Auswertung des Biegebalkens mit $d=5\text{mm}$
g	Erdbeschleunigung
h	Höhe
J	Flächenträgheitsmoment
l	Länge
m	Masse
M	Moment, Biegemoment
M_{mx}	Moment an der Mutter um x-Achse
M_{my}	Moment an der Mutter um y-Achse
M_{mz}	Moment an der Mutter um die z-Achse
M_{px}	Moment am Planeten um x-Achse

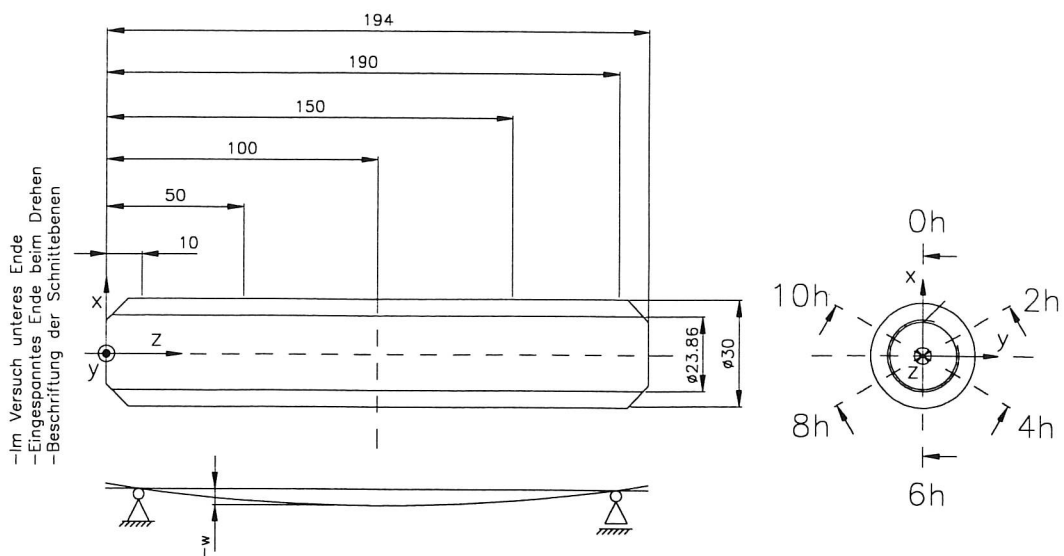
M_{py}	Moment am Planeten um y-Achse
M_{pz}	Moment am Planeten um z-Achse
M_{sx}	Moment an der Spindelstange um x-Achse
M_{sy}	Moment an der Spindelstange um y-Achse
M_{sz}	Moment an der Spindelstange um z-Achse
n	„nach der Belastung im spannungsoptischen Einfrierversuch“
n	Drehzahl
n	Einheitsvektor in Flächennormalenrichtung
$N_{pm,i}$	Normalkräfte in den Kontakten Planet-Mutter
$N_{ps,i}$	Normalkräfte in den Kontakten Planet-Spindelstange
n_0	Brechungsindex in verformungsfreiem Material
n_1	Brechungsindex in Richtung der ersten Hauptspannung
n_2	Brechungsindex in Richtung der zweiten Hauptspannung
Pl1..5	Schnitttrichtungen mit Planet 1...5
Q	Querkraft
R	Radius
S	Schwerpunkt
S_{ges}	Gesamtsteigung der PWG
S_P	Steigung Planetengewinde
S_S	Steigung Spindelstangengewinde
v	Translationsgeschwindigkeit
v	„vor der Belastung im spannungsoptischen Einfrierversuch“
V_{px}	Verschiebungsfreiheitsgrad in x-Richtung
w	Durchbiegung, Absenkung
x	Variable
z	Anzahl der Isochromaten über die Balkenhöhe
z_{d2}	Anzahl der Isochromaten über die Balkenhöhe mit d=2mm
z_{d5}	Anzahl der Isochromaten über die Balkenhöhe mit d=5mm
0h-6h, 2h-8h, 4h-10h	Schnitttrichtungen
α	Wärmeausdehnungskoeffizient
α_k	Kerbzahl
δ	Isochromatenordnung
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz
ε	Dehnung
φ_B	Blickwinkel
λ	Wellenlänge
μ	Reibkoeffizient, max. Reibwinkel
σ_n	Normalspannung
σ_y	Normalspannung in y-Richtung
σ_x	Normalspannung in x-Richtung
σ_1	erste Hauptspannung
σ_2	zweite Hauptspannung
σ_v	Vergleichsspannung nach Mises
τ_{xy}	Schubspannung am Schnittufer x in y-Richtung
ω	Winkelgeschwindigkeit
→	„Hinweis“
⇒	„Daraus folgt“
'	„bzgl. Modell“

10. Anhang

A. Meßprotokolle

- Spindelstange
- Normmutter
- Planet 1
- Planet 2
- Planet 3
- Planet 4
- Planet 5

Meßprotokoll: Spindelstange



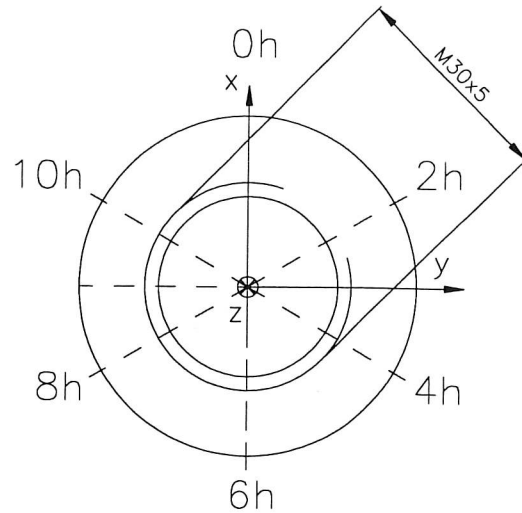
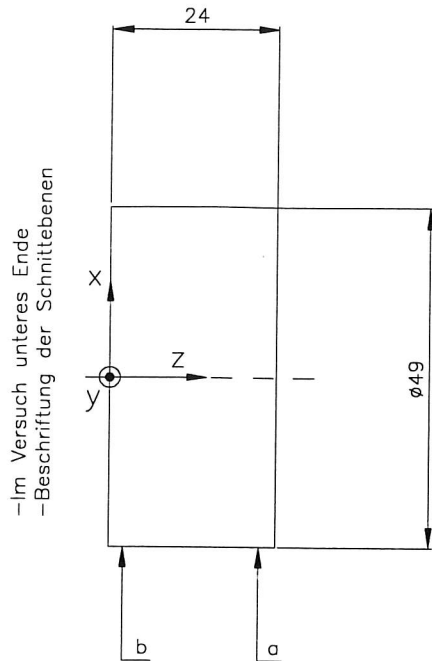
		0h		2h ($\equiv P14$)		4h ($\equiv P13$)		6h ($\equiv P12$)		8h		10h	
		v	n	v	n	v	n	v	n	v	n	v	n
Durchbiegung: w in [mm]	10	0	0	0	0	0	0	$= (-1) \times 0h$		$= (-1) \times 2h$		$= (-1) \times 4h$	
	50	0,06	0,05	0,03	0,20	-0,03	0,17						
	100	0,07	0,05	0,05	0,25	-0,02	0,26						
	150	0,03	0,01	0,03	0,12	-0,01	0,15						
	190	0	0	0	0	0	0						
Gewindesteigung: [mm/Umdr.]	0-50-	5,00	5,007	5,00	5,006	5,00	5,010	5,00	5,000	5,00	5,006	5,00	5,007
	-100-	5,00	5,001	4,99	4,997	5,00	4,999	4,99	4,976	4,99	4,997	4,99	5,001
	-150-	5,00	5,012	4,99	5,009	4,99	5,018	4,99	5,014	4,99	5,009	5,00	5,009
	-190	5,00	5,010	5,00	5,010	4,99	5,013	4,99	5,013	4,99	5,010	5,00	5,011
	Mittel	5,00	5,006	5,00	5,009	5,00	5,009	5,00	5,008	4,99	5,006	5,00	5,006
Gewindeaußen-Ø: [mm]	10	28,13	28,13	28,12	28,06	28,10	28,09	$= 0h$		$= 2h$		$= 4h$	
	50	28,34	28,32	28,32	28,27	28,31	28,27						
	100	28,52	28,50	28,51	28,47	28,50	28,48						
	150	28,37	28,35	28,33	28,31	28,37	28,36						
	190	28,13	28,09	28,13	28,11	28,12	28,23						
Gewindekern-Ø: [mm]	10	22,22	22,24	22,22	22,22	22,20	22,22	$= 0h$		$= 2h$		$= 4h$	
	50	22,40	22,42	22,40	22,40	22,39	22,40						
	100	22,58	22,64	22,58	22,63	22,61	22,62						
	150	22,43	22,47	22,40	22,42	22,46	22,49						
	190	22,20	22,24	22,19	22,21	22,19	22,24						

Gesamtlänge: vorher: 194,24mm nachher: 194,45mm

Gewicht: 119,7g

Fehler im Einstellwinkel: $\approx 1,1^\circ$

Meßprotokoll: Normmutter



		0h		2h		4h		6h		8h		10h	
		v	n	v	n	v	n	v	n	v	n	v	n
Außen-Ø: [mm]	a	49,15	49,19	49,16	49,18	49,16	49,18	= 0h		= 2h		= 4h	
	b	49,15	49,15	49,15	49,14	49,16	49,14						
Länge:[mm]		24,01	24,01	24,01	24,00	24,01	24,00	24,01	24,00	24,01	24,01	24,01	24,01
Steigung: [mm/Umdr.]	1Umdr.	5,01	5,03	5,07	4,86	5,06	5,09	4,91	5,09	5,01	4,83	4,99	4,98
	2Umdr.	4,78	4,82	5,13	4,88	5,32	5,07	4,86	5,12	4,89	4,92	4,99	5,01
Innen-Ø: [mm]	a	24,48	24,52	24,48	24,50	24,48	24,51	= 0h		= 2h		= 4h	
	b	24,48	24,50	24,49	24,50	24,49	24,49						

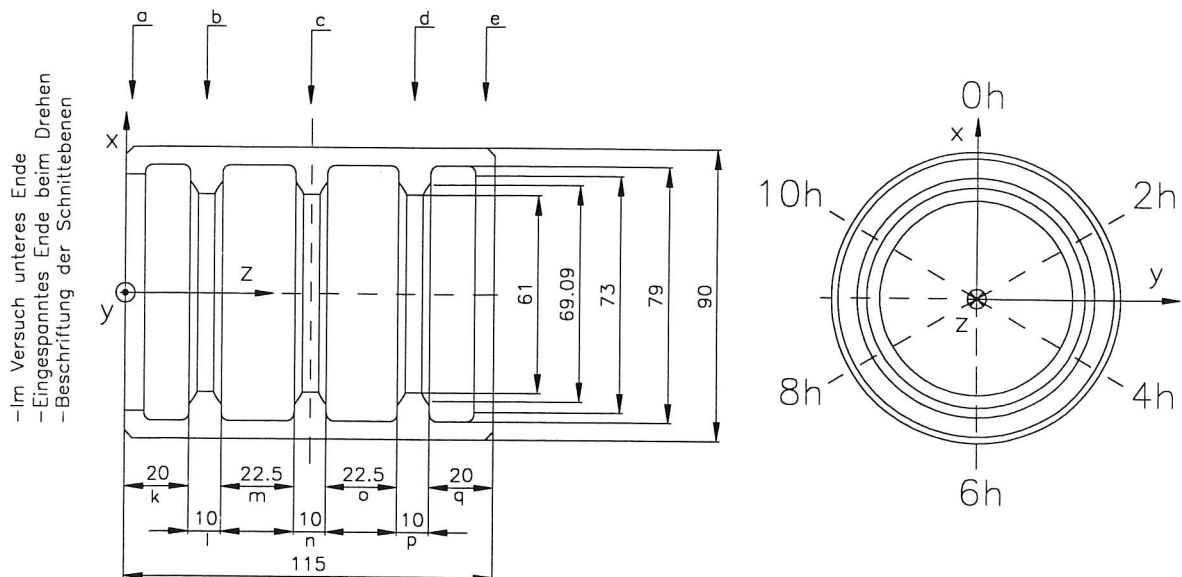
Gewicht:

vorher: 38,6g

nachher: 38,6g

Meßprotokoll: Mutter

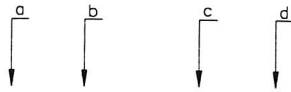
Meßstellen für Durchmesser:



		0h (\cong Pl2)		2h (\cong Pl1)		4h (\cong Pl5)		6h		8h		10h (\cong Pl3)	
		v	n	v	n	v	n	v	n	v	n	v	n
Außen-Ø: [mm] (Mikrometer- schraube)	a	90,09	90,19	90,10	90,02	90,09	90,14	= 0h		= 2h		= 4h	
	b	90,08	90,18	90,08	90,09	90,08	90,18						
	c	90,08	90,16	90,08	89,98	90,08	90,11						
	d	90,08	90,10	90,08	89,99	90,08	90,10						
	e	90,07	90,08	90,07	90,01	90,07	90,10						
Innen-Ø: [mm] (Mikrometer- schraube)	a	73,067	73,102	73,068	73,065	= 0h		= 2h		= 0h		= 2h	
	b	61,110	61,145	61,112	61,105								
	c	61,430	61,455	61,435	61,422								
	d	61,480	61,490	61,465	61,477								
	e	73,112	73,062	73,107	73,055								
Abstände: [mm] (Mikrometer- schraube, Meß- schieber)	k	20,09	20,02	20,10	20,05	20,09	20,02	20,09	20,04	20,09	20,03	20,09	20,02
	l	9,93	9,95	9,91	9,95	9,92	9,96	9,91	9,95	9,91	9,95	9,91	9,95
	m	22,57	22,56	22,57	22,56	22,56	22,55	22,57	22,58	22,56	22,60	22,57	22,62
	n	9,90	9,96	9,91	9,95	9,91	9,96	9,91	9,94	9,91	9,95	9,90	9,95
	o	22,56	22,56	22,56	22,56	22,56	22,56	22,57	22,55	22,57	22,58	22,57	22,57
	p	9,91	9,96	9,90	9,96	9,90	9,96	9,90	9,96	9,90	9,96	9,91	9,95
	q	20,08	20,09	20,08	20,07	20,08	20,07	20,08	20,08	20,08	20,07	20,08	20,08

Gesamtlänge: vorher: 115,18mm nachher: 115,19mm
 Gewicht: vorher: 283,8g nachher: 283,8g

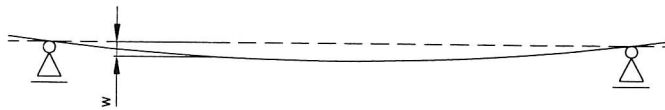
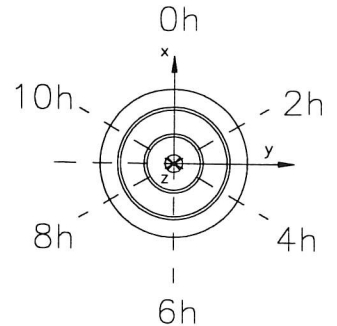
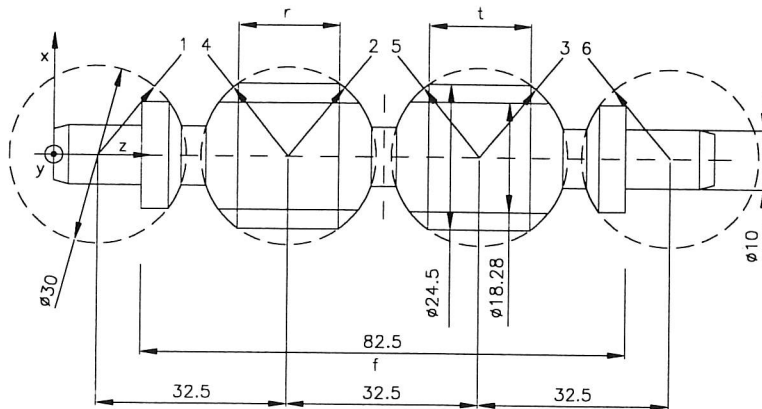
Meßprotokoll: Planet Nr.: 1 (1. Versuch)

Meßstellen für Kern- und Außen- \varnothing :

Zwischenmeßstellen : k l m



-Im Versuch unteres Ende
 -Eingespanntes Ende beim Drehen
 -Beschriftung der Schnittebenen



		0h		2h -Mutter		4h		6h		8h -Spindelst.		10h	
		v	n	v	n	v	n	v	n	v	n	v	n
Durchbiegung, Absenkung: w in [mm]	k												
	l												
	m												
	n	Durchbiegung bzw. Absenkung nicht von meßbarem Ausmaß.											
	o												
	p												
	q												
Gewindesteigung: [mm/Umdr.]	r	5,03	5,00	4,99	5,00	5,03	5,01	4,99	5,03	4,99	4,99	4,99	5,00
	t	5,02	5,00	5,01	5,01	4,98	5,00	4,99	4,99	5,01	5,00	5,01	5,00
	r...t	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	4,99	5,01	5,00	4,99	5,00	5,00
	Mittel	5,02	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	4,99	5,01	5,00	5,00	5,00	5,00
Gewindeaußen- \varnothing : [mm]	a	24,60	24,58	24,95	24,68	24,62	24,63	= 0h		= 2h		= 4h	
	b	24,62	24,62	24,61	24,70	24,64	24,65						
	c	24,62	24,61	24,63	24,70	24,66	24,64						
	d	24,64	24,64	24,63	24,66	24,71	24,63						

10. Anhang

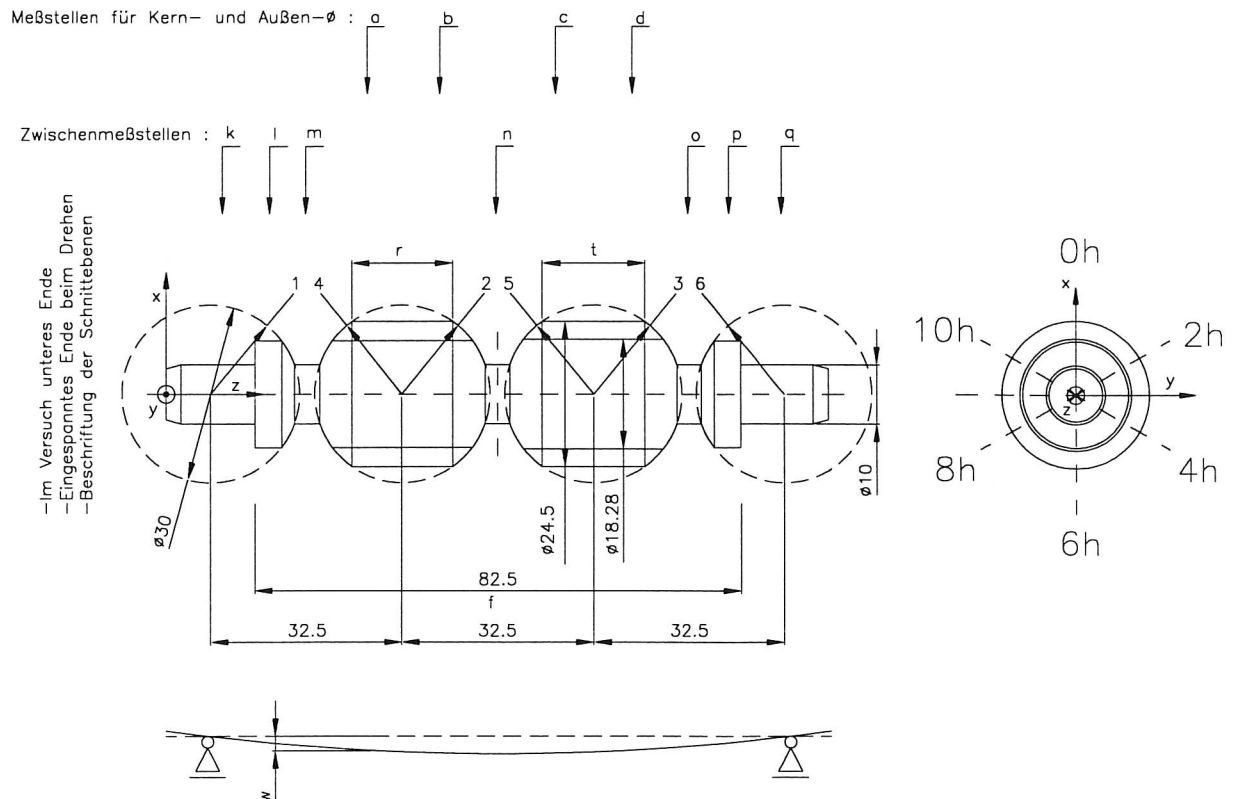
		0h		2h -Mutter		4h		6h		8h -Spindelst.		10h	
		v	n	v	n	v	n	v	n	v	n	v	n
Gewinde- kern-Ø: [mm]	a	18,37	18,35	18,37	18,47	18,42	18,40	= 0h		= 2h		= 4h	
	b	18,39	18,39	18,35	18,48	18,43	18,43						
	c	18,50	18,45	18,42	18,53	18,50	18,48						
	d	18,54	18,59	18,46	18,63	18,57	18,58						
Zwischen-Ø: [mm]	k	9,93	9,98	9,95	10,13	10,00	10,06	= 0h		= 2h		= 4h	
	l	18,12	18,13	17,90	18,26	18,16	18,20						
	m	10,15	10,16	10,15	10,28	10,18	10,21						
	n	10,13	10,10	10,09	10,18	10,14	10,12						
	o	10,12	10,11	10,08	10,14	10,15	10,12						
	p	18,23	18,22	18,21	18,25	18,23	18,24						
	q	10,21	10,20	10,19	10,21	10,25	10,20						
Bogen-Ø, Kugel-Ø: [mm]	1	26	26	28	29	32	26	29	27	29	28	29	24
	2	30	29	31	27	30	29	32	29	32	28	28	28
	3	33	30	32	31	23	30	32	30	33	30	30	30
	4	37	42	37	44	24	45	39	37	35	42	39	38
	5	45	44	43	46	51	51	43	41	45	46	50	45
	6	44	37	37	38	42	48	41	47	36	49	54	68
	Mittel: 1...3	30	29	30	29	29	28	31	28	31	29	29	27
	Mittel: 4...6	42	41	39	43	39	48	41	42	38	46	48	50

Länge f: vorher: 82,63mm nachher: 82,62mm

Gesamtlänge: vorher: 112,6mm nachher: 112,65mm

Gewicht: vorher: 31,1g nachher: 31,1g

Meßprotokoll: Planet Nr.: 2 (1.Versuch)



		0h		2h		4h		6h		8h		10h	
		-Spindelst.						-Mutter					
		v	n	v	n	v	n	v	n	v	n	v	n
Durchbiegung, Absenkung: w in [mm]	k												
	l												
	m												
	n	Durchbiegung bzw. Absenkung nicht von meßbarem Ausmaß.											
	o												
	p												
	q												
Gewindesteigung: [mm/Umdr.]	r	5,00	5,00	5,00	5,00	4,99	5,00	4,99	4,99	5,00	5,00	4,97	5,00
	t	4,98	4,99	5,02	5,00	5,03	5,00	4,99	5,01	5,02	5,01	4,99	5,00
	r...t	5,00	4,99	5,00	5,00	5,01	5,00	5,00	5,00	5,01	5,00	4,99	5,00
	Mittel	4,99	5,00	5,01	5,00	5,01	5,00	4,99	5,00	5,01	5,00	4,98	5,00
Gewinde- außen- ϕ : [mm]	a	24,60	24,58	24,62	24,60	24,63	24,60	= 0h		= 2h		= 4h	
	b	24,64	24,61	24,64	24,60	24,63	24,63						
	c	24,68	24,64	24,66	24,63	24,67	24,68						
	d	24,70	24,66	24,68	24,62	24,64	24,66						

10. Anhang

		0h		2h		4h		6h		8h		10h	
		-Spindelst.						-Mutter					
		v	n	v	n	v	n	v	n	v	n	v	n
Gewinde- kern-Ø: [mm]	a	18,39	18,37	18,42	18,39	18,42	18,42	= 0h		= 2h		= 4h	
	b	18,45	18,44	18,43	18,44	18,44	18,44						
	c	18,52	18,51	18,54	18,50	18,54	18,52						
	d	18,64	18,66	18,62	18,64	18,64	18,64						
Zwischen-Ø: [mm]	k	9,97	10,00	9,96	9,98	9,99	10,02	= 0h		= 2h		= 4h	
	l	18,15	18,14	18,16	18,13	18,15	18,15						
	m	10,17	10,16	10,17	10,15	10,17	10,17						
	n	10,13	10,13	10,15	10,12	10,14	10,14						
	o	10,14	10,12	10,19	10,12	10,13	10,14						
	p	18,24	18,25	18,26	18,25	18,26	18,25						
	q	10,24	10,24	10,24	10,23	10,25	10,23						
Bogen-Ø, Kugel-Ø: [mm]	1	30	27	32	29	29	29	29	28	28	27	31	29
	2	32	27	30	29	32	29	31	29	30	29	31	28
	3	33	30	32	31	32	30	30	29	32	30	29	29
	4	38	41	40	41	44	42	40	70	48	42	43	40
	5	45	38	45	41	53	37	40	63	46	38	44	40
	6	77	71	43	51	53	39	49	58	44	47	71	71
	Mittel: 1...3	32	28	31	30	31	29	27	29	30	29	30	28
Mittel: 4...6		53	50	43	44	50	40	43	64	46	43	52	50

Länge f: vorher: 82,64mm nachher: 82,59mm

Gesamtlänge: vorher: 112,5mm nachher: 112,6mm

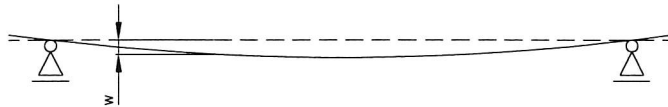
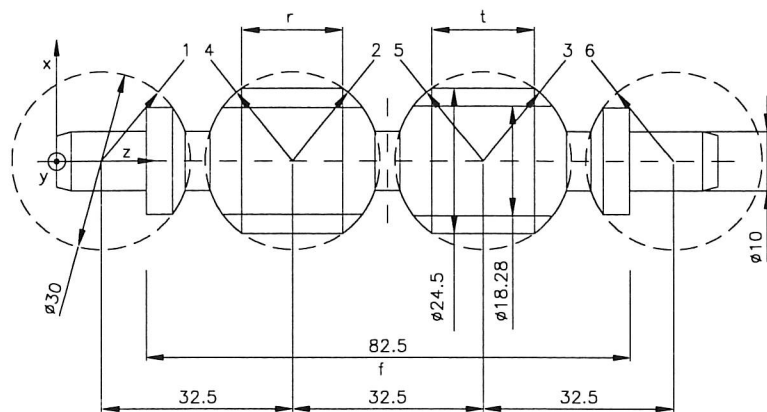
Gewicht: vorher: 31,3g nachher: 31,3g

Meßprotokoll: Planet Nr.: 3 (1.Versuch)

Meßstellen für Kern- und Außen- ϕ : a b c d

Zwischenmeßstellen : k l m n o p q

– Im Versuch unteres Ende
– Eingespanntes Ende beim Drehen
– Beschriftung der Schnittebenen



		0h		2h -Spindelst.		4h		6h		8h -Mutter		10h	
		v	n	v	n	v	n	v	n	v	n	v	n
Durchbiegung, Absenkung: w in [mm]	k												
	l												
	m												
	n	Durchbiegung bzw. Absenkung nicht von meßbarem Ausmaß.											
	o												
	p												
	q												
Gewindesteigung: [mm/Umdr.]	r	5,00	5,00	4,97	4,99	5,00	5,00	4,99	5,00	5,00	5,00	4,99	4,99
	t	5,01	5,00	5,01	5,00	5,01	5,00	5,01	5,01	5,02	5,00	5,02	5,00
	r...t	5,00	4,99	5,00	4,99	5,00	4,99	5,00	5,00	5,01	5,00	5,00	5,00
	Mittel	5,00	5,00	4,99	4,99	5,00	5,00	5,00	5,00	5,01	5,00	5,01	5,00
Gewindeaußen- ϕ : [mm]	a	24,60	24,59	24,64	24,60	24,60	24,60	= 0h		= 2h		= 4h	
	b	24,65	24,62	24,64	24,62	24,65	24,63						
	c	24,66	24,66	24,67	24,65	24,65	24,68						
	d	24,72	24,66	24,67	24,73	24,68	24,65						

10. Anhang

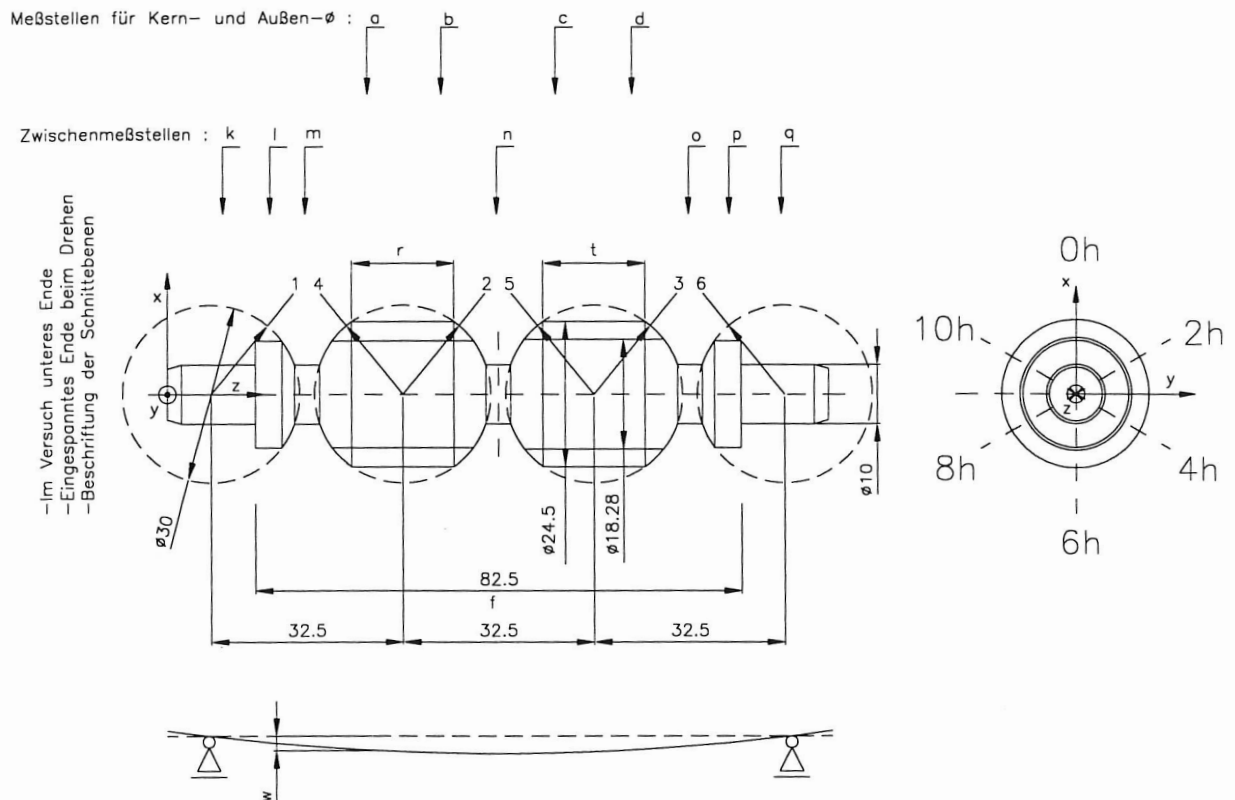
		0h		2h -Spindelst.		4h		6h		8h -Mutter		10h	
		v	n	v	n	v	n	v	n	v	n	v	n
Gewinde- kern-Ø: [mm]	a	18,45	18,43	18,45	18,42	18,43	18,45	= 0h		= 2h		= 4h	
	b	18,47	18,48	18,48	18,49	18,47	18,49						
	c	18,59	18,58	18,58	18,56	18,58	18,59						
	d	18,66	18,71	18,66	18,70	18,64	18,68						
Zwischen-Ø: [mm]	k	9,97	9,97	9,97	9,97	9,98	9,98	= 0h		= 2h		= 4h	
	l	18,10	18,09	18,10	18,09	18,11	18,10						
	m	10,10	10,07	10,10	10,07	10,09	10,08						
	n	10,12	10,12	10,13	10,13	10,12	10,14						
	o	10,12	10,15	10,13	10,14	10,15	10,15						
	p	18,16	18,16	18,16	18,15	18,16	18,16						
	q	10,13	10,12	10,13	10,12	10,13	10,14						
Bogen-Ø, Kugel-Ø: [mm]	1	29	27	30	27	29	26	29	26	28	27	25	25
	2	26	27	25	28	29	29	29	29	26	27	27	28
	3	29	27	30	28	30	28	28	28	28	30	29	26
	4	37	47	43	47	37	43	37	45	38	59	35	41
	5	39	41	39	40	40	39	42	39	41	39	40	38
	6	50	87	46	48	49	51	45	44	45	43	37	43
	Mittel: 1...3	28	27	28	27	29	28	29	28	27	28	27	27
Mittel: 4...6		42	58	42	45	42	44	41	42	41	47	37	41

Länge f: vorher: 82,67mm nachher: 82,61mm

Gesamtlänge: vorher: 112,51mm nachher: 112,55mm

Gewicht: vorher: 31,1g nachher: 31,1g

Meßprotokoll: Planet Nr.: 4 (1.Versuch)



		0h		2h		4h -Spindelst.		6h		8h		10h -Mutter	
		v	n	v	n	v	n	v	n	v	n	v	n
Durchbiegung, Absenkung: w in [mm]	k												
	l												
	m												
	n	Durchbiegung bzw. Absenkung nicht von meßbarem Ausmaß.											
	o												
	p												
	q												
Gewinde- steigung: [mm/Umdr.]	r	5,02	5,00	5,01	5,00	4,99	4,99	4,98	5,00	4,98	5,00	5,00	5,00
	t	4,98	4,99	4,99	5,00	4,99	5,00	5,00	5,00	5,01	5,01	5,02	5,00
	r...t	5,01	5,00	5,01	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
	Mittel	5,00	5,00	5,00	5,00	4,99	5,00	4,99	5,00	4,99	5,00	5,00	5,00
Gewinde- außen- \emptyset : [mm]	a	24,61	24,63	24,60	24,63	24,59	24,60	= 0h		= 2h		= 4h	
	b	24,60	24,61	24,63	24,62	24,60	24,62						
	c	24,61	24,63	24,61	24,61	24,64	24,63						
	d	24,62	24,60	24,62	24,63	24,62	24,65						

10. Anhang

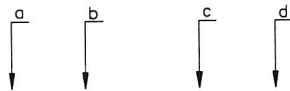
		0h		2h		4h -Spindelst.		6h		8h		10h -Mutter	
		v	n	v	n	v	n	v	n	v	n	v	n
Gewinde- kern-Ø: [mm]	a	18,33	18,38	18,37	18,41	18,35	18,38	= 0h		= 2h		= 4h	
	b	18,35	18,39	18,36	18,40	18,36	18,40						
	c	18,41	18,42	18,38	18,45	18,43	18,44						
	d	18,44	18,45	18,43	18,50	18,43	18,52						
Zwischen-Ø: [mm]	k	9,97	10,02	9,96	10,02	9,96	10,00	= 0h		= 2h		= 4h	
	l	18,14	18,16	18,14	18,16	18,13	18,15						
	m	10,16	10,17	10,12	10,17	10,14	10,17						
	n	10,08	10,09	10,09	10,10	10,08	10,10						
	o	10,04	10,03	10,05	10,06	10,03	10,08						
	p	18,01	17,99	17,99	18,01	17,99	18,04						
	q	10,05	10,05	10,05	10,07	10,03	10,08						
Bogen-Ø, Kugel-Ø: [mm]	1	28	29	29	28	26	29	29	29	28	27	28	30
	2	34	33	35	31	30	34	32	30	35	36	30	32
	3	36	37	40	36	42	37	39	35	34	34	36	36
	4	47	45	43	47	51	57	41	43	44	45	46	47
	5	49	51	51	48	51	49	46	44	51	47	57	48
	6	44	47	44	46	48	46	45	47	53	48	43	47
	Mittel: 1...3	33	33	35	32	33	33	33	31	32	32	31	33
	Mittel: 4...6	46	48	46	47	50	50	44	45	50	47	49	47

Länge f: vorher: 82,58mm nachher: 82,55mm

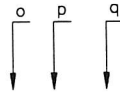
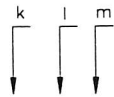
Gesamtlänge: vorher: 112,54mm nachher: 112,61mm

Gewicht: vorher: 30,8g nachher: 30,8g

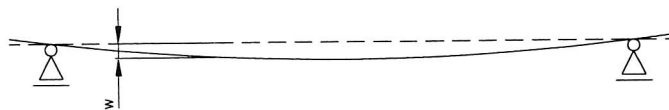
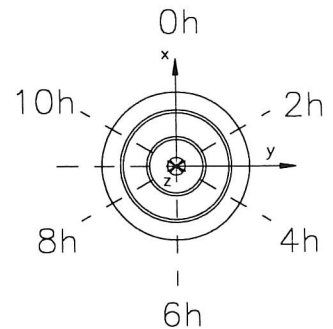
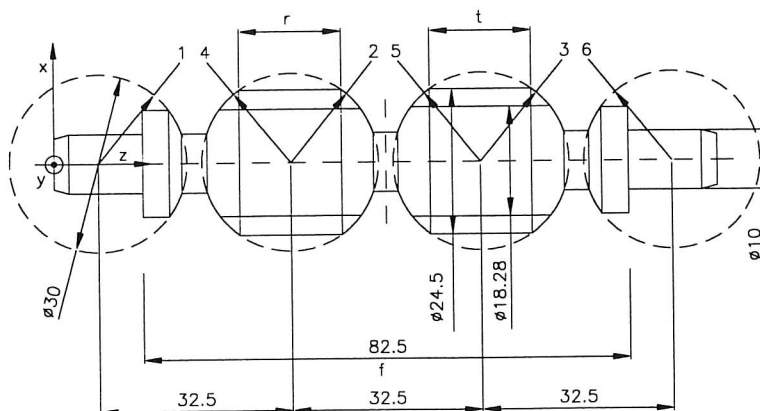
Meßprotokoll: Planet Nr.: 5 (1.Versuch)

Meßstellen für Kern- und Außen- \emptyset :

Zwischenmeßstellen : k l m



-Im Versuch unteres Ende
-Eingespanntes Ende beim Drehen
-Beschriftung der Schnittebenen



		0h		2h		4h -Mutter		6h		8h		10h -Spindelst.	
		v	n	v	n	v	n	v	n	v	n	v	n
Durchbiegung, Absenkung: w in [mm]	k												
	l												
	m												
	n	Durchbiegung bzw. Absenkung nicht von meßbarem Ausmaß.											
	o												
	p												
	q												
Gewinde- steigung: [mm/Umdr.]	r	4,99	5,00	5,01	5,00	5,00	4,99	5,00	5,00	5,00	5,00	5,01	5,00
	t	4,99	5,00	5,00	5,00	5,01	5,01	4,98	5,00	5,01	5,01	5,00	4,99
	r...t	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
	Mittel	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,01	5,00	5,00
Gewinde- außen- \emptyset : [mm]	a	24,60	24,58	24,61	24,59	24,63	24,57	= 0h		= 2h		= 4h	
	b	26,63	24,61	24,62	24,62	24,62	24,61						
	c	24,59	24,57	24,63	24,64	24,64	24,62						
	d	24,69	24,68	24,66	24,70	24,69	24,67						

10. Anhang

		0h		2h		4h -Mutter		6h		8h		10h -Spindelst.	
		v	n	v	n	v	n	v	n	v	n	v	n
Gewinde- kern-Ø: [mm]	a	18,37	18,37	18,39	18,36	18,38	18,34	= 0h		= 2h		= 4h	
	b	18,39	18,38	18,39	18,36	18,40	18,39						
	c	18,46	18,44	18,45	18,43	18,47	18,44						
	d	18,48	18,53	18,47	18,52	18,51	18,53						
Zwischen-Ø: [mm]	k	9,97	9,97	9,97	10,04	9,98	9,97	= 0h		= 2h		= 4h	
	l	18,13	18,11	18,13	18,13	18,14	18,13						
	m	10,12	10,13	10,12	10,16	10,15	10,13						
	n	10,11	10,10	10,11	10,09	10,10	10,09						
	o	10,12	10,11	10,12	10,12	10,12	10,11						
	p	18,23	18,22	18,23	18,24	18,23	18,22						
	q	10,23	10,21	10,24	10,22	10,23	10,22						
Bogen-Ø, Kugel-Ø: [mm]	1	28	30	27	26	29	26	27	25	27	29	28	29
	2	30	29	28	27	31	30	31	31	32	31	32	30
	3	32	30	30	31	30	30	31	30	33	43	31	32
	4	44	41	40	45	41	54	45	42	44	44	39	43
	5	65	45	54	50	65	67	62	52	50	50	69	45
	6	40	47	51	45	48	46	40	45	45	46	53	47
	Mittel: 1...3	30	29	29	28	30	29	30	28	31	34	31	30
	Mittel: 4...6	50	44	48	47	51	55	49	46	47	47	53	45

Länge f: vorher: 82,63mm nachher: 82,60mm

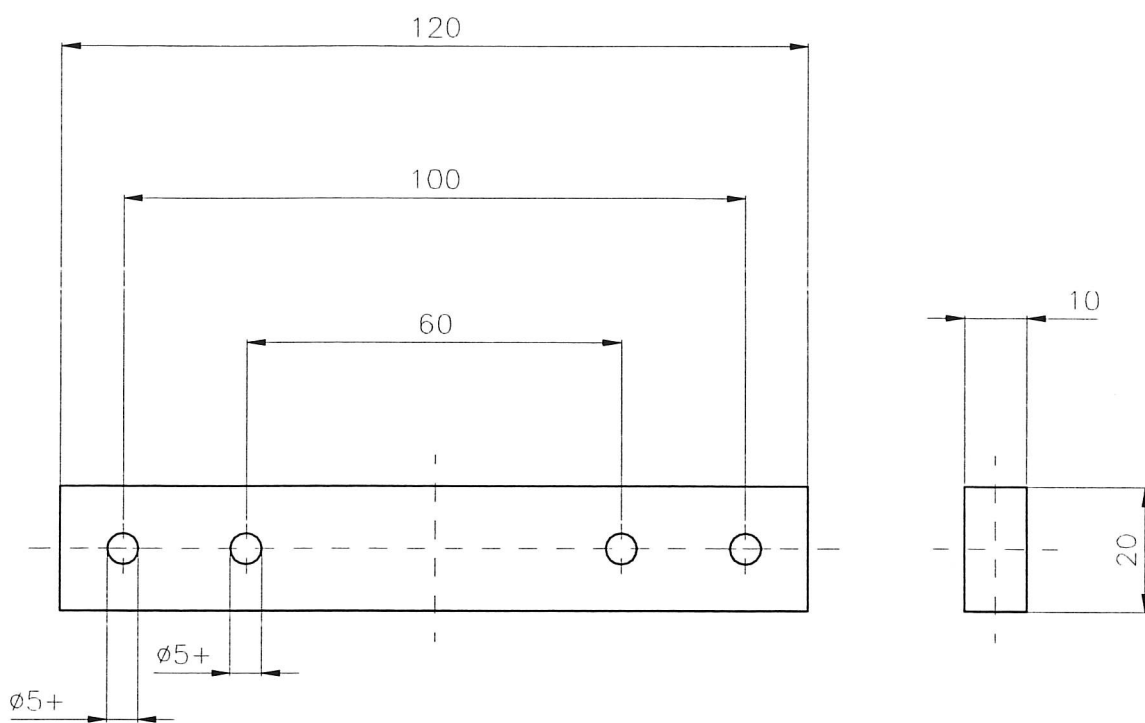
Gesamtlänge: vorher: 112,43mm nachher: 112,62mm

Gewicht: vorher: 31,0g nachher: 31,0g

B. Zeichnungen

- Kalibrierversuch
- Versuchsaufbau für PWG im Einfrierversuch

1x



Abt.: Robotersysteme
82234 Weßling
DLR Tel.: 08153 / 28-2400

NAME	DATUM	TOLERANZ : DIN 7168
BEARB. Haehnle		MATERIAL : Araldit-B
GEPR.		

ZUST.	NAME	DATUM	ÄNDERUNG

Kalibrierversuch

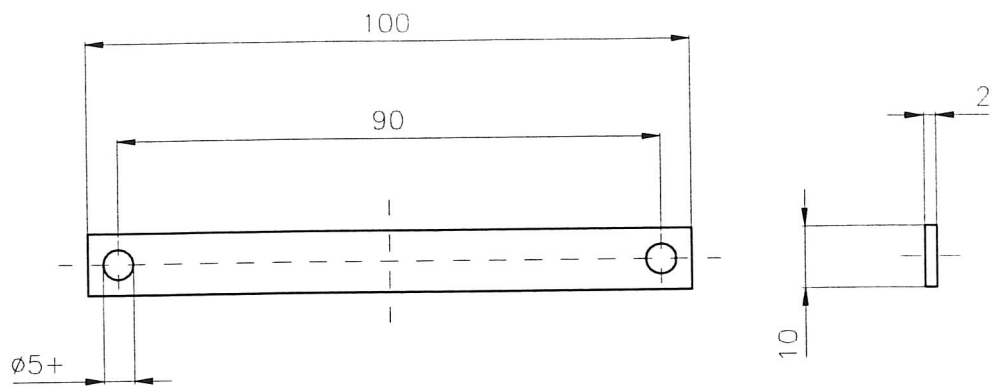
DATEI : aufbeich

BLATT : 2/5

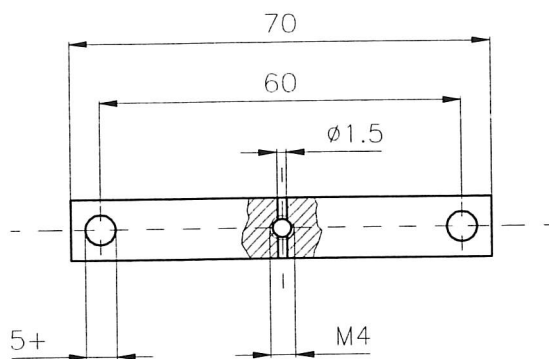
NUMMER :

MAßSTAB :

4x



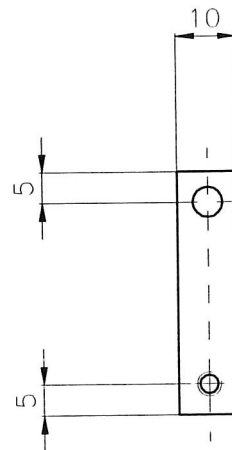
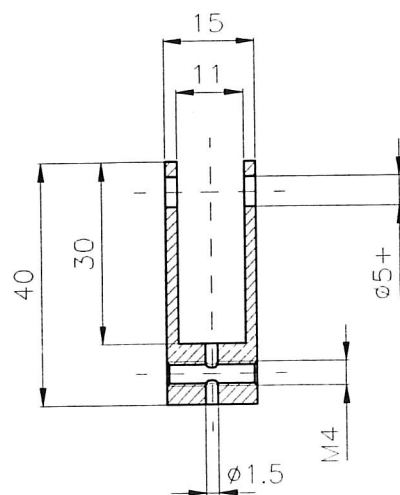
1x



1x

s.o. ohne Bohrungen ø5

2x



Abt.: Robotersysteme
82234 Weßling
DLR Tel.: 08153 / 28-2400

NAME

DATUM

TOLERANZ : DIN 7168

BEARB.

Haehnle

MATERIAL : Stahl

GEPR.

ZUST. NAME DATUM ÄNDERUNG

Kalibrierversuch

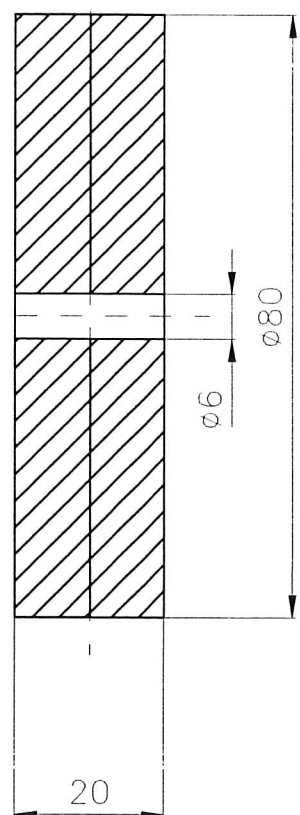
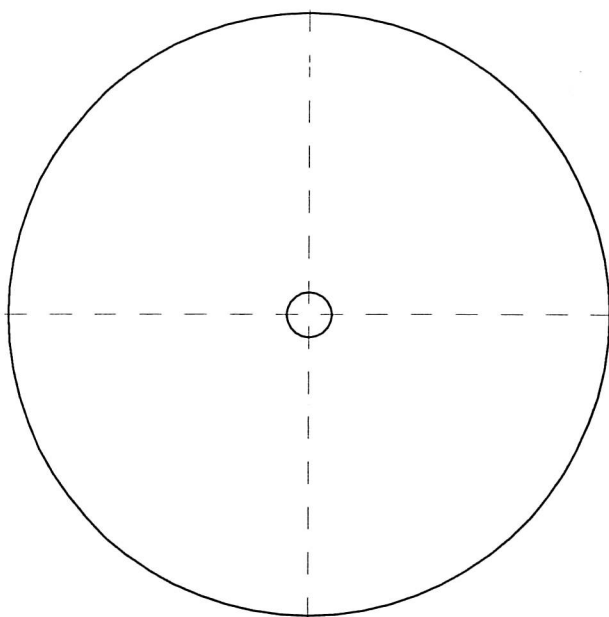
DATEI : aufbeich

BLATT : 3/5

NUMMER :

MAßSTAB :

12x

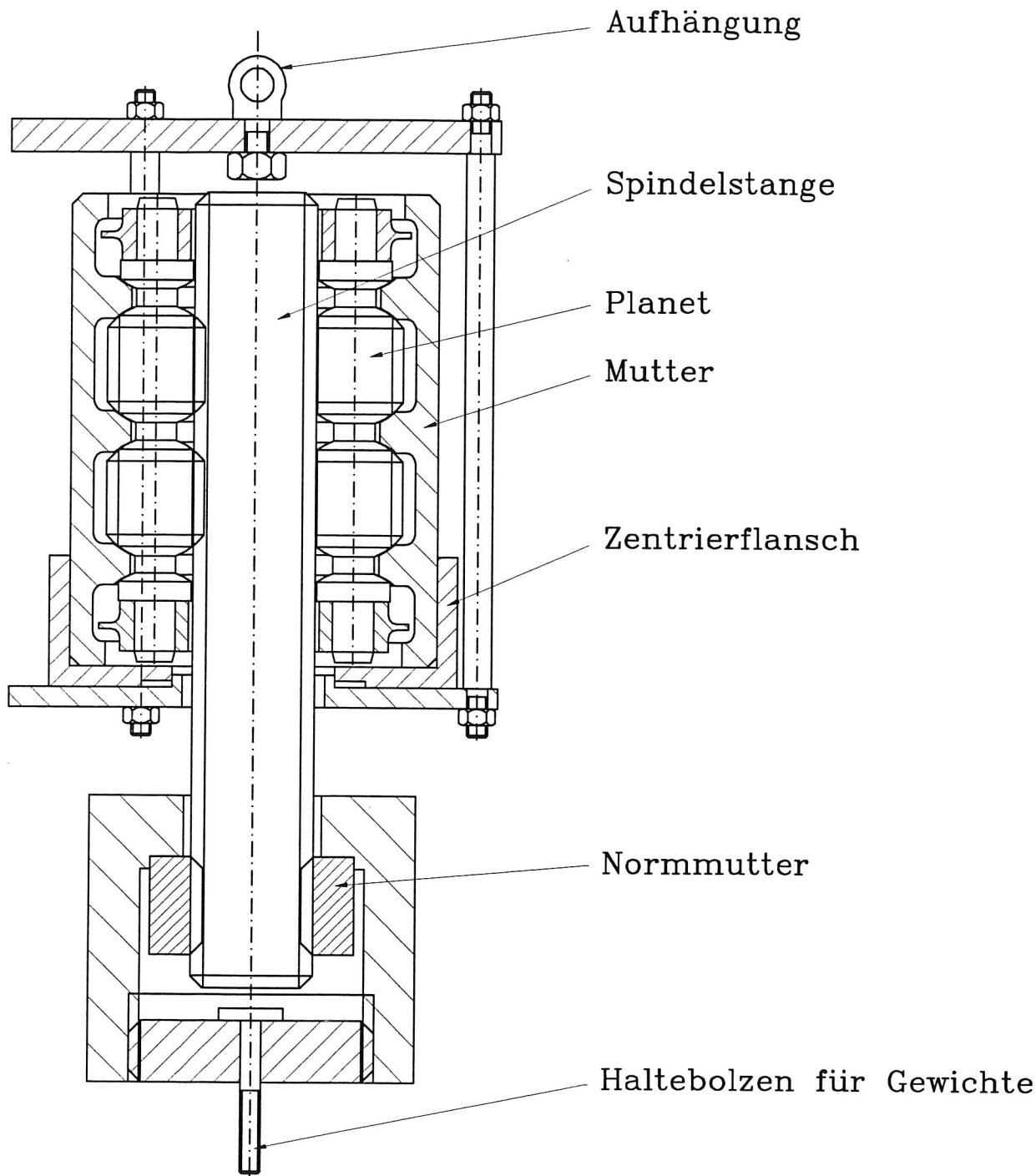


Abt.: Robotersysteme
82234 Weßling
DLR Tel.: 08153 / 28-2400

NAME	DATUM	TOLERANZ :
BEARB. Haehnle	20.06.95	MATERIAL : Stahl
GEPR.		

ZUST.	NAME	DATUM

<h1>Kalibrierversuch</h1>		DATEI : aufbeich	BLATT : 5/5
		NUMMER :	MAßSTAB : 1:1



Abt.: Robotersysteme
82234 Weßling
Tel.: 08153 / 28-1622

NAME	DATUM	TOLERANZ : DIN 7168 "mittel"
BEARB. Balazs		MATERIAL : Stahl, Araldit-B
GEPR.		

ZUST.	NAME	DATUM	ÄNDERUNG
	Hahn/e	20.07.95	PWG-Typ

Versuchsaufbau für PWG im Einfrierversuch

DATEI :

BLATT : 1/1

NUMMER :

MAßSTAB :

C. Programme

- Programm zur Überstzung von „.txt“-Files in „.dxf“-Files
- Programm für Temperaturkurve im spannungsoptischen Einfrierversuch

```

/*
PROGRAMM zur Uebersetzung von ".txt"-Files
in ".dxf"-Files

```

Matthias Haehnle, Juli 1995, Programmiersprache: Borland C++

```
*/
```

```
#include <stdio.h>
#include <string.h>
```

```
float x[62];
float y[62];
```

```
void main()
```

```

{
    FILE * fp;
    char dummy[40];
    char vorzeichen;
    int j;
    char dateiname[50];

    printf("Bitte den Dateinamen des ASCII-Files mit Pfad
                                                eingeben\n");
    gets(dateiname); // .txt-Filename mit Pfad eingeben
    fp = fopen(dateiname, "r");
    if (fp != NULL)
    {
        fgets(dummy, 40, fp);
        fgets(dummy, 40, fp);
        fgets(dummy, 40, fp);

        for(j=0; j<62; j++) // 62 MessPUNKTE werden eingelesen
        {
            fgets(dummy, 40, fp);
            fscanf(fp, " Z=%c %f ABS ", &vorzeichen, &(x[j]));
            if(vorzeichen == '-') x[j] = -x[j];
            fscanf(fp, " X=%c %f ABS ", &vorzeichen, &(y[j]));
            if(vorzeichen == '-') y[j] = -y[j];
        }
        fclose(fp);

        strcat(dateiname, ".dxf");
        fp = fopen(dateiname, "w");

        fprintf(fp, " 0\nSECTION\n 2\nENTITIES\n");

        for(j=0; j<62; j++) // 62 MessPUNKTE werden geschrieben
        {
            fprintf(fp, " 0\nPOINT\n 8\n0\n 10\n%f\n 20\n%f\n 30\n0.0\n",
                    x[j],
                    y[j] );
        }
        fprintf(fp, " 0\nENDSEC\n 0\nEOF");

        fclose(fp);
    }
}

```

Programm für Temperaturkurve im spannungsoptischen Einfrierversuch:

Programmiersprache: Turbo Pascal

```
{===== M A I N      P R O G R A M =====}

BEGIN
  clrscr;
  init;
  hera_init;
  hera_on;

  rampe(20,102,120);
  status;
  if falarm then alarm;

  wait(720,102);
  status;
  if falarm then alarm;

  rampe(102,135,120);
  status;
  if falarm then alarm;

  wait(210,135);
  status;
  if falarm then alarm;

  rampe(135,60,1.5);
  status;
  if falarm then alarm;

  hera_off;
  status;
  if falarm then alarm;
  sectick;

END.

{-----}

USES DOS,CRT,grafunit,iounit;

{-----}

VAR   inpt,ulstr,timestr,
      actstr,secstr                                :string;
      hera,tin                                     :text;
      i                                             :longint;
      t1,b,u1                                       :integer;
      h,m,s,s1                                      :word;
      actmin,actten,actsec                         :word;
      tempanf,tempend,tempwait,tempact,steig       :real;
      twait,trest,twarte                          :integer;
      c,mkey                                        :char;
      framp,fwait,falarm,break_it,ende,
      secramp,secwait,inaction                    :boolean;

{-----}
```



```

PROCEDURE init;

BEGIN
    nosound;
    falarm:=false;
    framp:=false;
    fwait:=false;
    secramp:=false;
    secwait:=false;
    break_it:=false;
    ende:=false;

    trest:=0;
    twait:=0;
    twarte:=0;
    tempanf:=0;
    tempend:=0;
    tempwait:=0;
    tempact:=0;
    steig:=0;

    actstr:=' ----';
    secstr:=' ----';
    inaction:=false;
END;

{-----}

PROCEDURE time;

VAR h,m,s,s1      :word;
    hs,ms,ss      :string;

BEGIN
    gettime(h,m,s,s1);
    str(h:2,hs);
    str(m:2,ms);
    str(s:2,ss);
    timestr:=hs+':'+ms+':'+ss;

END;

{-----}

PROCEDURE showtime;

VAR h,m,s,s1      :word;

BEGIN
    gettime(h,m,s,s1);
    writeln(h:2,':',m:2,':',s:2,':',s1:2);

END;

{-----}

PROCEDURE alarm;

BEGIN
    sound(4000);
    delay(500);
    nosound;
END;

{-----}

```

```

PROCEDURE hera_init;

BEGIN
    assign (hera, 'com1');
    rewrite(hera);
    assign (tin, 'com1');
    reset (tin);
END;

{-----}

PROCEDURE hera_off;
BEGIN
    writeln(hera, 'R00000000');
END;

{-----}

PROCEDURE hera_on;
BEGIN
    writeln(hera, 'R00000001');
END;

{-----}

PROCEDURE mintick;

VAR h,m,s,s1      :word;

BEGIN
    repeat
        gettime(h,m,s,s1);
    until ((m-actmin)>=1) or keypressed;
    actmin:=m;
END;

{-----}

PROCEDURE tentick;

VAR h,m,s,s1      :word;

BEGIN
    repeat
        gettime(h,m,s,s1);
    until ((s-actten)>=10) or keypressed;
    actten:=s;
END;

{-----}

PROCEDURE sectick;

VAR h,m,s,s1      :word;

BEGIN
    repeat
        gettime(h,m,s,s1);
    until ((s-actsec)<>0) or keypressed;
    actsec:=s;
END;

{-----}

```

```
PROCEDURE hera_temp(temp:real);

VAR      u1      :integer;
         ulstr    :string[6];
         outstr   :string;

BEGIN
    u1:=round(temp*10)+485;
    str(u1,ulstr);
    outstr:='U1'+copy('0000',0,4-length(ulstr))+ulstr;
    writeln(outstr);
    writeln(hera,outstr);
END;

{-----}

PROCEDURE menu;

VAR      i      :integer;

BEGIN
    writeln(' < 1 >      Ofen ein           ');
    writeln(' < 2 >      Ofen aus           ');

    writeln(' < 7 >      Abbruch/weiter (10sec) ');
    writeln(' < 9 >      Alarm Aus           ');

    for i:=0 to 1000 do
    begin
        if keypressed then begin
            mkey:=readkey;
            CASE mkey OF
                '1' :BEGIN
                    hera_on;
                    END;
                '2' :BEGIN
                    hera_off;
                    END;
                '7' :BEGIN
                    break_it:=true;
                    END;
                '9' :BEGIN
                    falarm:=false;
                    END;
            ELSE      BEGIN
                    sound(7000);
                    delay(300);
                    nosound;
                    END;
            END;
        end;
    end;

END;

{-----}
```

```

PROCEDURE status;

VAR      s                      :word;
          t                      :integer;

BEGIN
  clrscr;
  time;
  writeln('          Steuerprogramm f•r Temperaturschrank HER•US
');
  writeln('Spannungsoptischer Einfrierversuch: Trocknen - Erweichen
- Erstarren');
  writeln('23.05.95                      Matthias H„hnle
VER 1.0');
  writeln;
  writeln('                      'Uhrzeit:
':40,timestr);
  writeln;
  writeln('Aktion : ',actstr);
  writeln;
  writeln('Akt.Soll-Temperatur          : ',tempact:4:1,'°C');
  writeln;
  writeln('Anfangstemperatur            : ',tempanf:4:1,'°C');
  writeln('Endtemperatur                : ',tempend:4:1,'°C');
  writeln('Temperatur„nderung (+/-)    : ',steig:4:1,'°C/h');
  writeln;
  writeln('Haltetemperatur                : ',tempwait:4:1,'°C');
  writeln('Wartezeit                      : ',twarte:4,'min');
  writeln('Restwartezeit bei Haltetemp.: ',trest+1:4,'min');

  writeln;
  writeln;

END;

{-----}

PROCEDURE rampe(tanf,tend,steigung:real);

VAR      s                      :word;
          i                      :integer;
          temp,dtemp            :real;

BEGIN
  tempanf:=tanf; tempend:=tend; steig:=steigung;

  actstr:='Lineare Temperatur„nderung';
  dtemp:=steigung/60/6;
  temp:=tanf;
  falarm:=false;
  if tempanf < tempend then begin
    repeat
      tempact:=temp;
      hera_temp(temp);
      temp:=temp+dtemp;
      status;
      menu;
      tentick;

      until (temp >= tend) or break_it;
    end
  end

```

```

else begin
  repeat
    tempact:=temp;
    hera_temp(temp);
    temp:=temp-dtemp;
    status;
    menu;
    tentick;
    hera_on;

    until (temp <= tend) or break_it;
  end;
  if not break_it then hera_temp(tend);
  break_it:=false;
  actstr:=secstr;
  secstr:=' ----- ';

  alarm;

  steig:=0; tempanf:=0; tempend:=0;

END;

{-----}

PROCEDURE wait(twait:integer;temp:real);

VAR      s                      :word;
         t,ten                  :integer;

BEGIN
  actstr:='Warten bei Haltetemperatur';

  tempwait:=temp; twarte:=twait;
  tempanf:=temp;  tempend:=temp;

  t:=twait;

  repeat
    hera_temp(temp);
    sound(500);
    tempact:=temp;
    dec(t);
    trest:=t;
    nosound;
    ten:=0;
    repeat
      status;
      menu;
      tentick;
      inc(ten);
      hera_on;
    until (ten>=6) or break_it;

    until (t<=0) or break_it;
    falarm:=true;
    break_it:=false;
    actstr:=secstr;
    secstr:=' ----- ';

    twarte:=0; trest:=0; tempwait:=0; tempanf:=0; tempend:=0;

  END;

  {-----}

```


D. Materialblätter

- Araldit-B
- Permagum
- PA66, PE, Spezialkunststoffe

®Araldit- Festharz- Giesssysteme

CIBA-GEIGY GmbH
Division Polymere
Verkaufsbüro München
Nymphenburger Str. 148
8 0 6 3 4 M Ü N C H E N
Tel. 0 89 / 16 01 99 · FAX 0 89 / 16 43 77

Juni 1980

**Araldit B₄₁ oder B₄₆
Härter HT 901 oder HT 903
Mineralische Füllstoffe**

Gew. Tle
**100
30 bzw. 40
200-250**

Anwendungsgebiete

Herstellung von Elektroisolierteilen für Innenraumanwendungen im Mittel- und Hochspannungsbereich, z. B. für Strom- und Spannungswandler, Leistungstransformatoren, Leistungsschalter und -Anlagen, sowie für mechanisch, thermisch oder chemisch hochbeanspruchte Konstruktionsteile.

Verarbeitungsmethoden

Konventionelle Giesstechnik (Seite 5) und Druckgeliervorgang (Seite 8). Harz und Härter sind entsprechend der vorgesehenen Anwendung sowie den vorhandenen Verarbeitungsanlagen auszuwählen. Je nach Wahl von Harz, Härter und Zusatzstoffen können Gebrauchsdauer und Exothermie beeinflusst werden (siehe Merkblatt Araldit B₄₀-B₄₆, Publ. Nr. 37112/2/d).

Endeigenschaften

Blasenfreie Giessharzformstoffe mit hervorragenden mechanischen, thermischen und elektrischen Festigkeiten auch unter Langzeitbeanspruchung. Der geringe Schwund bei der Härtung ermöglicht die Herstellung grossvolumiger Giesslinge und das rissfreie Einbetten von Metallteilen und Leitern.

CIBA-GEIGY

Produktebeschreibung

(Richtwerte)

Araldit B₄₁
Araldit B₄₆

In Viskosität und Reaktivität mit den empfohlenen Härtern in engen Grenzen spezifizierte, unmodifizierte Epoxidharze auf Basis von Bisphenol A. Lösungsmittelfrei und bei Raumtemperatur fest und geruchlos.

Araldit B₄₁ – Standardqualität für die vielfältigsten Anwendungen.

Araldit B₄₆ – Spezialqualität für die Herstellung grossvolumiger Giesslinge (geringerer Schwund und geringere Exothermie im Vergleich zu Araldit B₄₁).

		Araldit B ₄₁	Araldit B ₄₆
Viskosität bei 120°C	mPa s	380–520	700–850
Viskositätsaufbau 120°C/24 h	%	≤ 10	≤ 10
Schmelzbereich	°C	35–50	35–50
Epoxidgehalt	Äquiv./kg	2,5–2,8	2,25–2,55
Flammpunkt (DIN 51758)	°C	> 200	> 200
Spezifisches Gewicht 25°C	g/cm ³	1,15–1,25	1,15–1,25
Dampfdruck 150°C	mbar	ca. 1 · 10 ^{–2}	ca. 1 · 10 ^{–2}
Lieferform		hellgelbes bis gelbes Festharz	
Lagerfähigkeit		2 Jahre	
Gefährliche Zersetzungsprodukte		Kohlenmonoxid und Kohlendioxid im Brandfall	
Entsorgung		Normale Vernichtungsmethoden laut lokalen Vorschriften	

Härter HT 901
Härter HT 903

Bei Raumtemperatur feste, geruchlose Härter auf Basis von Karbonsäureanhydriden.

Die Härter HT 901 und HT 903 sind feuchtigkeitsempfindlich. Die durch Feuchtigkeit entstehende Säure hat negative Auswirkungen auf die Reaktivität und Endeigenschaften.

		Härter HT 901	Härter HT 903
Schmelzbereich	°C	128–132	80–85
Flammpunkt (DIN 51758)	°C	140	135
Spezifisches Gewicht			
25°C	g/cm ³	1,48–1,53	1,48–1,53
130°C (flüssig)	g/cm ³	1,22–1,25	1,22–1,25
Dampfdruck 130°C	mbar	ca. 8	ca. 5
Säuregehalt	%	≤ 3	≤ 3
Lieferform		weisses Pulver	
Lagerfähigkeit		1 Jahr	
Gefährliche Zersetzungsprodukte		Kohlenmonoxid und Kohlendioxid im Brandfall	
Entsorgung		Normale Vernichtungsmethoden laut lokalen Vorschriften	

Mechanische und physikalische Eigenschaften

Gemessen an Normprüfkörpern bei 23°C, Härtung: 16 h bei 140°C

Eigenschaften	Norm	Einheit	System 1 ¹⁾	System 2	System 3	System 4 ¹⁾	System 5	System 6
Zugfestigkeit								
Max. Zugspannung $\sigma_{Z \max}$	ISO/R 527	N/mm ²	70-90	80-100	80-100	60-85	70-90	70-90
Bruchdehnung	ISO/R 527	%	5-7	1,0-1,4	1,0-1,4	5-6	0,8-1,2	0,8-1,2
Druckfestigkeit								
Max. Druckspannung $\sigma_{D \max}$	ISO/R 604	N/mm ²	100-130	180-200	180-200	100-130	180-200	180-200
Kugeldruckhärte	ISO/DR 2039	N/mm ²	90-100	130-150	130-150	90-100	130-150	130-150
Biegefestigkeit								
30-s-Wert, Methode b								
Max. Biegespannung $\sigma_{b \max}$	ISO/R 178	N/mm ²	100-120	130-150	130-150	100-120	120-140	120-140
	DIN 53452	N/mm ²	140-150	140-150	145-155	140-150	130-140	135-140
	DIN 53452	%	8	1,7	1,8	9	1,9	2,0
Randfaserdehnung								
Durchbiegung	ISO/R 178	mm	17-19	3,5-4,0	3,5-4,0	17-19	3,5-4,0	3,5-4,0
	DIN 53452	mm	12-14	2,5-3,5	2,5-3,5	13-15	3-4	3-4
Schlagzähigkeit	ISO/R 179	kJ/m ²	40-50	14-19	14-19	40-60	16-22	16-22
Kerbschlagzähigkeit	ISO/R 179	kJ/m ²	5-7	2-3	2-3	5-7	2-3	2-3
Elastizitätsmodul aus Zugversuch	ISO/R 527	N/mm ²	3700-4500	12000-13000	13000-14000	3700-4500	13000-15000	13000-15000
Spannungsoptische Konstante S		kg/cm ²	10,3	-	-	10,3	-	-
Spezifisches Gewicht		g/cm ³	1,15-1,25	1,6-1,7	1,6-1,7	1,15-1,25	1,6-1,7	1,6-1,7
Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient zwischen 25 und 80°C	VSM 77110	K ⁻¹ · 10 ⁻⁶	60-65	30-35	30-35	60-65	30-35	30-35
Formbeständigkeit in der Wärme								
nach Martens	DIN 53458	°C	90-100	105-115	105-115	80-90	90-105	90-105
Umwandlungstemperatur	DSC	°C	115-130	115-130	115-130	105-120	105-120	105-120
Wärmeleitfähigkeit bei 80°C								
in Anlehnung an spezifische Wärme	DIN 53612	W/mK	0,17-0,23	0,8-0,9	0,8-0,9	0,15-0,20	0,7-0,8	0,7-0,8
Glutbeständigkeit	DIN 53459	Stufe	3a	2b	2b	3a	2b	2b
Zersetzungstemperatur	VSM 77113	°C	350-360	350-360	350-360	350-360	350-360	350-360
Wasseraufnahme								
Prüfkörper 60x10x4 mm		%	0,25-0,35	0,15-0,25	0,15-0,25	0,25-0,35	0,15-0,25	0,15-0,25
10 Tage bei 23°C	ISO/R 62	%	0,20-0,25	0,1-0,2	0,1-0,2	0,2-0,3	0,1-0,2	0,1-0,2
30 min bei 100°C	ISO/R 117	%						

¹⁾ Diese Werte gelten mit geringfügigen Abweichungen für alle ungefüllt vergossenen Typen von Araldit B.



ESPE

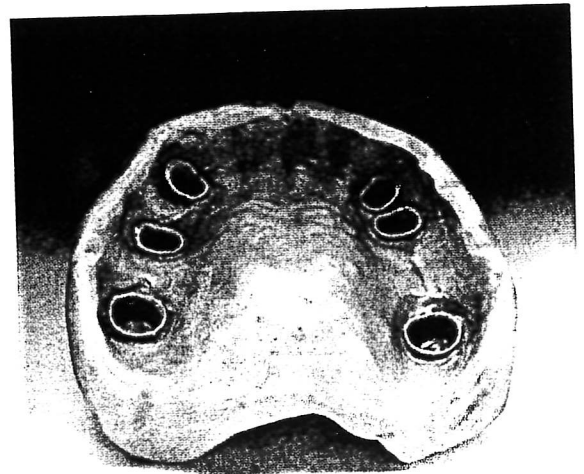
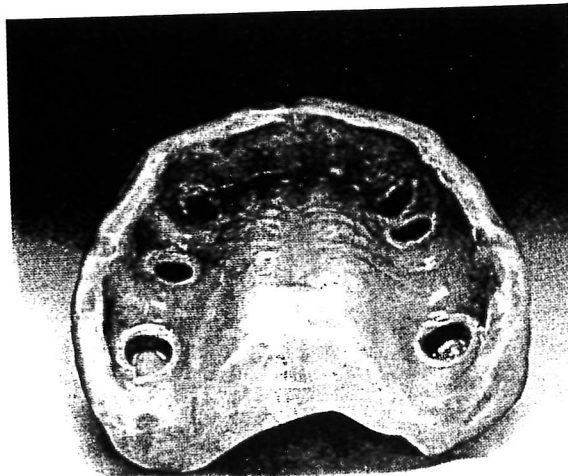
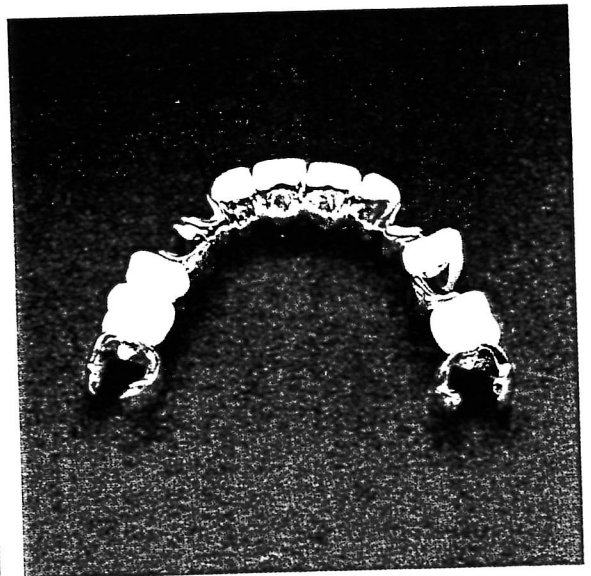
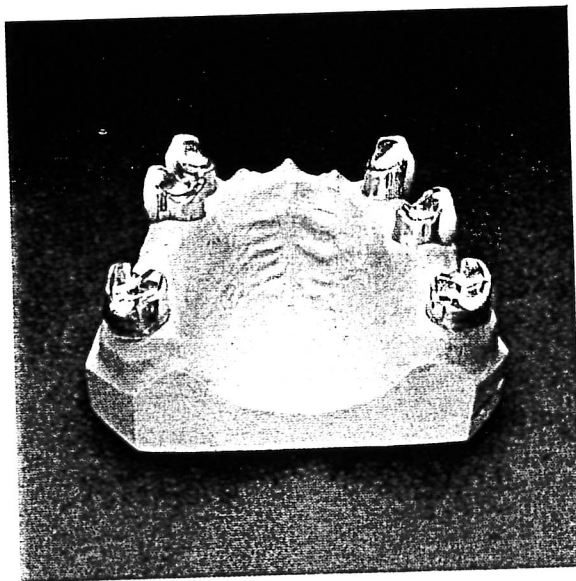
Permagum[®]

Elastomere Vinyl Polysiloxan Abdruckmasse
für **Korrekturabdrücke**
(Doppelabdrucktechnik)

das neuartige Silikon-Elastomer
von höchster Präzision



ESPE
FABRIK
PHARMAZEUTISCHER
PRÄPARATE
GMBH & CO. KG
D-8031 SEEFELD
OBERBAY.
W. GERMANY





ESPE

Permagum®

K-Material (knetbar) grün
Dünne Konsistenz (Korrektur) braun

ESPE
FABRIK
PHARMAZEUTISCHER
PRÄPARATE
GMBH & CO. KG
D-8031 SEEFELD
OBERBAY.
W. GERMANY

■ PERMAGUM K-Material (knetbar) und Dünne Konsistenz (Korrektur) sind additionsvernetzende Elastomere Vinyl Polysiloxan Abdruckmassen zur Herstellung von Inlays, Kronen und Brücken nach der Korrekturabdruckmethode.

■ PERMAGUM ist ein neuartiges Silikon-Elastomer von höchster Präzision, dessen Abbindung durch Edelmetallkatalysatoren (Platin) eingeleitet wird. Dadurch ist im Gegensatz zu den bisherigen Silikonabdruckmassen* die Volumenbeständigkeit nicht mehr durch flüchtige Bestandteile gefährdet, auch bei Lagerung über mehrere Tage.

■ PERMAGUM K-Material (knetbar) ergibt einen festen, nicht rückfedernen Vorabdruck mit großer Shorehärte. PERMAGUM Dünne Konsistenz (Korrektur) gibt dank seines guten Anfließvermögens auch feinste Details mit größter Exaktheit wieder.

■ Die genaue Dosierung von PERMAGUM ist durch das Zweipastensystem gewährleistet. Basispaste und Katalysatorpaste sind von gleicher Viskosität und unterschiedlicher Farbe. Dadurch ist bei PERMAGUM eine leichte Vermischung und eine zuverlässige Anmischkontrolle sichergestellt.

■ PERMAGUM-Abdrücke können mit allen bekannten Modellmaterialien ausgegossen werden; um den Vorteil der hohen Präzision voll auszunutzen, wird die Verwendung von IMPREDUR** empfohlen.

■ PERMAGUM-Abdrücke können verkupfert oder versilbert werden.

■ PERMAGUM K-Material und PERMAGUM Dünne Konsistenz sind zwei Jahre lagerfähig.

* PERMAGUM® darf nicht mit den herkömmlichen Silikonabdruckmassen kombiniert werden.

** IMPREDUR® Präzisions Composite Modellmaterial auf Epimin® Basis der Firma ESPE.

ESPE

Permagum[®]



die entscheidende Verbesserung
in der **Doppelabdrucktechnik**

Meßwerte nach ADA-Spezifikation Nr. 19

	K-Material	Dünne Konsistenz
Anmischzeit	45 sec	30 sec
Verarbeitungszeit	3 min	2 min 30 sec
Abbindezeit	5 min	5 min
Dimensionsverhalten (isotherm)	-0,05 %	-0,06 %
Bleibende Deformation	0,3 %	0,4 %

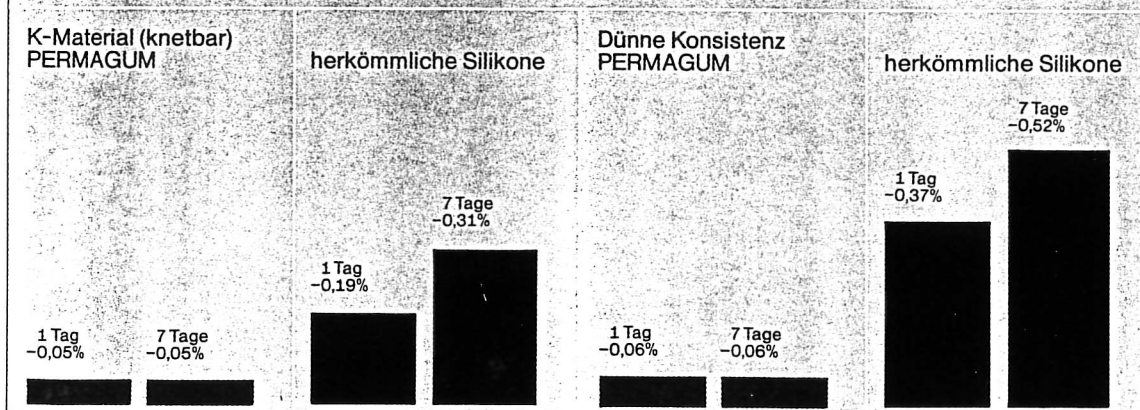
PERMAGUM[®]
erfüllt in allen
Punkten die
Anforderungen
der ADA-Spezifi-
kation Nr. 19.

PERMAGUM im Vergleich zu konventionellen Silikonabdruckmassen



Formkonstanz (Schrumpf)

Prüfkörper hergestellt nach ADA-Spezifikation Nr. 19, gemessen nach 1 Tag und 7 Tagen (isotherm).



ZUSAMMENFASSUNG

Herkömmliche Silikone schrumpfen beträchtlich. PERMAGUM ist in den für die Präzision entscheidenden Eigenschaften überlegen.

ESPE

Permagum[®]



Elastomere Vinyl Polysiloxan Abdruckmasse
für **Korrekturabdrücke**
(Doppelabdrucktechnik)

PACKUNGEN

K-MATERIAL (knetbar) grün
mit Paste, Katalysator, Adhesive und Anmischblock

DÜNNE KONSISTENZ (Korrektur) braun
mit Paste, Katalysator und Anmischblock

ADHESIVE



ESPE
FABRIK
PHARMAZEUTISCHER
PRÄPARATE
GMBH & CO. KG
D-8031 SEEFELD
OBERBAY.
W. GERMANY

ENSINGER				Polyamide				Mechanische Werte				Thermische Werte				Elektrische Werte				Verschiedene Daten														
Werkstoffbezeichnung	DIN-Bezeichnung	Zusätze bzw. Farbe	Dauergebrauchstemperatur C	Dichte (DIN 53 479)	Streckspannung (DIN 53 455)	Bruchdehnung (DIN 53 455)	E ₀ MPa	E _{0,2} MPa	H _k MPa	Schlagzähigkeit (DIN 53 453) o.Br. ± ohne Bruch	Zeitstandfestigkeit statischer Belastung 1000 h bei	Bruchdehnungskoeffizient μ (Beding. wie zuvor) gegen Stahl gehärtet u. geschl. p = 0,05 N/mm ² v = 0,6 m/s	V _g µm/km	T _g C (DIN 53 735)	Wärmeformbeständigkeit nach ISO-R 75, Verfahren A (DIN 53 461)	Wärmeformbeständigkeit nach ISO-R 75, Verfahren B (DIN 53 461)	Gebrauchstemperatur kurzzeitig	Wärmeleitfähigkeit (23 C) λ W/(K·m)	Spezifische Wärmekapazität (23 C) c J/(g·K)	Wärmeausdehnungskoeffizient (23 C) α 10 ⁻¹ /K	Dielektrizitätszahl (10 ³ Hz) ϵ'	Dielektrischer Verlustfaktor (10 ³ Hz) $\tan \delta$	Spez. Durchgangswiderstand (DIN 53 482, VDE 0303 Teil 3)	Oberflächenwiderstand (DIN 53 482, VDE 0303 Teil 2)	Durchschlagsfestigkeit E _g kV/mm (DIN 53 481, IEC-243, VDE 0303, Teil 2)	Kriechstromfestigkeit (DIN 53 480, VDE 0303, Teil 1)	Feuchtigkeitseinkaufnahme im NK bis zur Sättigung (DIN 53 715)	Wasseraufnahme bis zur Sättigung (DIN 53 495)	Beständigkeit gegen heisses Wasser, Waschlungen	Brennbarkeit nach UL-Standard 94	Verhalten bei Freiwitterung	Werkstoffbezeichnung		
TECAMID 46	PA 46		130	1,18	65° 80	30° 280°	1200° 3500	170-200	o.Br.		0,2-0,45		295		160		220	0,3	2,1	7,5	9,4-1,1	0,21-0,35	10 ¹¹	>20	KC >25	3,7	14	-	V2	-	TECAMID 46			
TECAMID 46 GF 30	PA 46 GF 30	30% Glasfasern	130	1,41	120° 210	4° 9200	190-276	55-70					295				220	0,33	1,7	4	4,1	0,013	10 ¹¹	20			2,6	10	+	HB	-	TECAMID 46 GF 30		
TECAMID 6-6-T	PA 6-6-T		130	1,14	100° 110	10° 20°	3500	190	o.Br.		0,34-0,42		295		110		250	0,23	1,5	5,5	4	0,03-0,04	10 ¹¹	50-80	KC 600	2	7,5	(+)	V2	-	TECAMID 6-6-T			
TECAMID 6-6-T GF 30	PA 6-6-T GF 30	30% Glasfasern	140	1,34	140° 170	3° 8500°	200						295		245		270	0,25	1,4	2,5-5	4,3-4,5	0,03-0,04	10 ¹¹	50-80	KC 600	2	0,2-0,8	4,5	(+)	HB	-	TECAMID 6-6-T GF 30		
TECAMID 66	PA 66		120	1,14	70° 90	40° 2000°	2830	100-170	o.Br.	55		0,35-0,42	255	5°	100	>200	170	0,23	1,7	7	3,6-5	0,025-0,2	10 ¹¹	28-30	KA 3c KA 3b	2,8	8,5	(+)	V2	-	TECAMID 66			
TECAMID 66 HI	PA 66	braun	110	1,14	60° 80	30° 1600°	100-165	o.Br.		6		0,45-0,5	255	5°	100	200	180	0,23	1,7	10	3,2-5	0,025-0,2	10 ¹¹	80-110	KC >600	2,8	8,5	(+)	V2	-	TECAMID 66 HI			
TECAMID 66 GF 30	PA 66 GF 30	30% Glasfasern, schwarz	110	1,35	140° 200	3,5° 7500°	200-270	13-17		40		0,16-0,2	255	5°	250	250	200	0,27	1,5	2-3							1,5	5,5	(+)	HB	+	TECAMID 66 GF 30		
TECAMID 66 CF 20	PA 66 CF 20	20% Kohlenfasern, schwarz	110	1,23	150° 220	6° 11000°	200-240	35-55					255	5°	245	250	200	0,43	1,8	2,5							2	6,5	(+)	HB	+	TECAMID 66 CF 20		
TECAMID 66 SF 20	PA 66 SF 20	20% Aramidfasern, schwarz	100	1,19	50° 70	10° 1600°	100-140	25		90		0,39	255	5°	225	254	170			6-10	3,8-9,4						2	6,7	(+)	HB	+	TECAMID 66 SF 20		
TECAMID 66 LA	PA 66	Gleitmittel	100	1,10	70°	40° 2700	100-140	25				0,18-0,2	255	5°	85	185	120	0,23	1,7	7-10	3,3	0,015	10 ¹¹	80-120	KB >600	2,2	7,5	(+)	HB	-	TECAMID 66 LA			
TECAMID 66 MH	PA 66	MoS ₂ , schwarz	100	1,14	90°	35° 4000°	110-180	o.Br.			8,5	0,2-0,25	255	5°	105	>200	175	0,23	1,8	5-6							3	7	(+)	HB	+	TECAMID 66 MH		
TECAST HI	PA 6 G	braun	115	1,15	60° 85	30° 3000°	170						220	40°		180	180			8	3,7	0,03	5x10 ¹⁰	50	KA 3c KA 3b	2,5	7	(+)	HB	-	TECAST HI			
TECAST R	PA 6 G	auch in blau	100	1,15	60° 85	30° 3000°	170						220	40°		180	180			8									2,5	6,7	(+)	HB	-	TECAST R
TECAST T	PA 6 G	auch in blau	100	1,15	60° 85	30° 3300	90-160	o.Br.		50		0,4	220	40°	95°	195	180	0,24	1,7	5-6	3,7	0,03	5x10 ¹⁰	50	KA 3c KA 3b	2,5	6,7	(+)	HB	-	TECAST T			
TECAST ST	PA 6 G		100	1,15	50° 70°	20° 2000	95						200	40°			150	0,24	1,5	10									5,6	(+)	HB	-	TECAST ST	
TECAST M	PA 6 G	MoS ₂ , anthrazit	100	1,15	90°	30° 3500	175						220	40°			180			8,5									6,7	(+)	HB	+	TECAST M	
TECAST TM	PA 6 G	MoS ₂ , schwarz	100	1,15	75°	40° 2800	145						210	40°			170			9,5									6	(+)	HB	+	TECAST TM	
TECAST L	PA 6 G	Öl	100	1,15	70°	20° 2500	125						220	40°			180			9									6	(+)	HB	-	TECAST L	
TECAM 6 MO	PA 6	MoS ₂ , schwarz	100	1,14	85°	40° 3300	85-170	o.Br.			5	0,32-0,37	220	40°	100	195	165	0,23	1,7	7									2,5-3	8,9	(+)	HB	+	TECAM 6 MO
TECAMID 6	PA 6		100	1,14	60° 85	70° 1800°	70-160	o.Br.		45		0,38-0,45	220	40°	75	190	160	0,23	1,7	7	3,7-7	0,031-0,3	10 ¹¹ -10 ¹³	20-50	KA 3c KA 3b	3	9,5	(+)	HB	-	TECAMID 6			
TECAMID 6 GF 30	PA 6 GF 30	30% Glasfasern, schwarz	100	1,35	110° 180°	3° 8000°	150-220	55-80			21-35	0,46-0,52	220	40°	210	220	180	0,28	1,5	2,5	4,6	0,02-0,2	10 ¹¹ -10 ¹³	40	KA 3a KB >400	2,1	6,6	(+)	HB	+	TECAMID 6 GF 30			
TECAMID TR	PA 6-3-T	transparent	100	1,12	60°	40° 3000	100	o.Br.		50	12		-	147	130	140	145	0,23	1,45	0,23	3,4	0,02-0,03	10 ¹¹	80	KA 3b KA 3c	2,6-3,4	5,6-6,4	(+)	HB	-	TECAMID TR			
TECAMID 610	PA 610		80	1,07	50° 70°	50° 1500°	80-120	o.Br.					215	50	95	195	180	0,23	1,7	9	3,4	0,03-0,2	10 ¹¹	60	KB 3b KC >600	1,4-	3,3	(+)	HB	-	TECAMID 610			
TECAMID 612	PA 612		80	1,07	52° 61	100° 1240°							210	50						9									0,4	(+)	HB	-	TECAMID 612	
TECAMID 11	PA 11		80	1,04	42° 47	230° 280°	1800		90	o.Br.	23	3,5	0,32-0,38	183	43	55	150	0,23	2,1	10	3,6	0,04	2x10 ¹¹	40	KA 3c	0,9	1,9	(+)	V2	-	TECAMID 11			
TECAMID 11 GF 30	PA 11 GF 30	30% Glasfasern	80	1,26	95° 100°	4° 6°	3200			18,3			183	43			150			0,3									0,45	1,3	+	HB	-	TECAMID 11 GF 30
TECAMID 12	PA 12		80	1,02	35° 46-52	240 1800		95	o.Br.	23	3,5	0,32-0,38	179	41	50	140	140	0,23	2,1	10	3,6	0,04	2x10 ¹¹	33	KA 3b KC 600	0,7	1,6	(+)	V2	-	TECAMID 12			
TECAMID 12 GF 30	PA 12 GF 30	30% Glasfasern	80	1,23	65°	5° 3500				50			179	41	120	165	150			3-7	0,04	0,04	8,5x10 ¹⁰	90	KB 400 KC 600	0,6	1	+	HB	-	TECAMID 12 GF 30			

Diese Angaben entsprechen dem heutigen Stand unserer Kenntnisse und sollen über unsere Produkte und deren Anwendungsmöglichkeiten informieren. Sie haben somit nicht die Bedeutung, bestimmte Eigenschaften der Produkte oder deren Eignung für einen konkreten

Einsatzweck rechtlich verbindlich zuzusichern. Etwa bestehende gewerbliche Schutzrechte sind zu berücksichtigen. Eine einwandfreie Qualität gewährleisten wir im Rahmen unserer Allgemeinen Verkaufsbedingungen. Die Werte sind Durchschnittswerte aus vielen Einzelmessungen.

(solern nicht anders vermerkt, aus Prüfungen an spritzgepresenen Probekörpern. Normprüfungen erfolgen im Normklima 23/50 nach DIN 50 014.

+ = beständig
(+) = bedingt beständig
- = unbeständig
Bemerkung: Bei Polyamiden sind die Werte stark von dem Feuchtigkeitsgehalt abhängig
* = feucht, nach Lagerung im Normklima 23/50 (DIN 50 014) bis zur Sättigung

abhängig von Konzentration, Zeit und Temperatur

Mechanische Werte										Thermische Werte										Elektrische Werte										Verschiedene Daten																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Werks- bezeichnung	DIN- Bezeichnung	Zusätze bzw. Farbe	Dauer- gebrauchs- temperatur °C	ρ g/cm³	σ _b MPa	σ _t MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀₀₀ MPa	σ ₁₀

Diese Angaben entsprechen dem heutigen Stand unserer Kenntnisse und sollen über unsere Produkte und deren Anwendungsmöglichkeiten informieren. Sie haben somit nicht die Bedeutung, bestimmte Eigenschaften der Produkte oder deren Eignung für einen konkreten

Einsatzzweck rechtlich verbindlich zuzusichern. Etwa bestehende gewerbliche Schutzrechte sind zu berücksichtigen. Eine einwandfreie Qualität gewährleisten wir im Rahmen unserer Allgemeinen Verkaufsbedingungen. Die Werte sind Durchschnittswerte aus vielen Einzelmessungen.

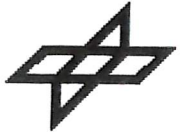
sofern nicht anders vermerkt, aus Prüfungen an spritzgepresenen Probekörpern. Normprüfungen erfolgen im Normklima 23/50 nach DIN 50 014.

+ = beständig
- = unbeständig

abhängig von Konzentration,
Zeit und Temperatur

E. Sonstiges

- Poster



"programmable spring"

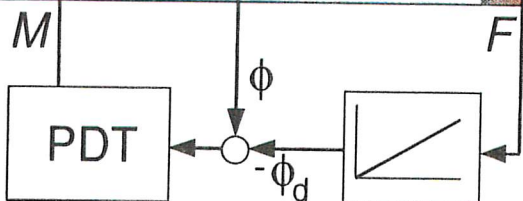
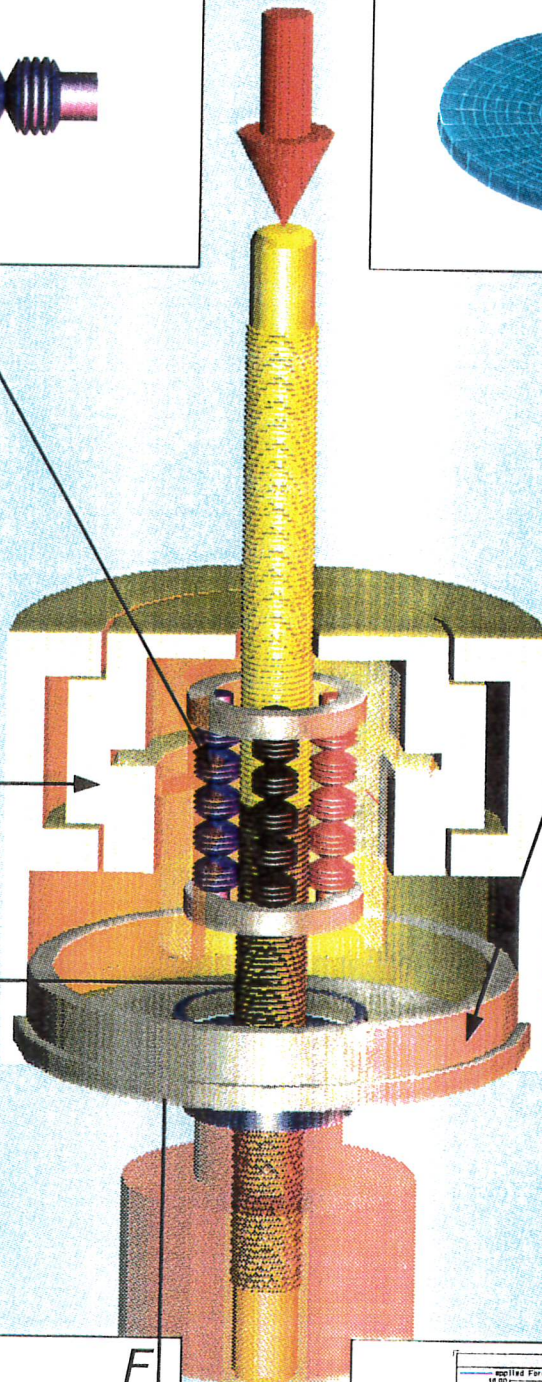


DLR Institute for Robotics and System Dynamics

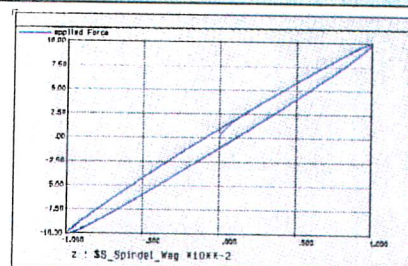
CAD - Pro/ENGINEER



FEM - ANSYS



SIMPACK dyn. controller



SIMPACK result